

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

PLAN DE RUTEO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE AYUDA HUMANITARIA NO ALIMENTARIA ANTE UN TERREMOTO DE GRAN MAGNITUD EN LIMA METROPOLITANA Y CALLAO

Tesis para optar por el Título de Ingeniero Industrial, que presenta el bachiller:

Renzo Alejandro Benavente Sotelo

ASESOR: Christian Santos Cornejo Sánchez

Lima, noviembre de 2016

Resumen

La presente investigación parte de analizar el peligro sísmico de Perú por pertenecer al Cinturón de Fuego del Pacífico y cómo esto afecta la vulnerabilidad de la sociedad. Se presentan los planes de emergencia con los que cuenta el Estado comparándolos con las normas propuestas por el Proyecto Esfera, haciendo énfasis en la norma correspondiente a la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria. Por ello se propone un modelo con fundamento científico que busque optimizar las rutas de distribución en menos de 72 horas, plazo máximo definido por INDECI.

Se presenta un escenario crítico de un terremoto de magnitud 8,0 Mw con epicentro frente a Lima, ante el cual se busca realizar la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria a 1 795 735 damnificados en Lima Metropolitana y Callao. Se trabaja bajo el supuesto que se cuenta con 22 almacenes los cuales abastecerán a 42 subestaciones propuestas. Cada subestación distribuirá los bienes a 50 nodos ubicados en parques aledaños. La población damnificada deberá acercarse al parque seleccionado para recibir tres *kits* de bienes de ayuda.

El modelo que mejor se ajusta a este escenario es un VRPTW; sin embargo, presenta limitaciones del software ya que el modelo es calificado como *NP-hard* debido a su complejidad computacional. Para superar esto se evalúan tres heurísticas clásicas: el algoritmo de ahorros, el método en dos fases y el algoritmo del vecino más cercano. La heurística seleccionada es el método en dos fases: asignando primero los nodos en grupos, usando el algoritmo de barrido, y luego determinar la ruta con ayuda de un modelo TSP.

Luego de realizar la heurística a cada una de las 42 subestaciones, se concluye que sí se llega a cumplir con la norma de 72 horas realizando un recorrido total de 70 800 kilómetros. Adicionalmente, se presentan escenarios evaluando una menor cantidad de vehículos en las subestaciones que presenten holguras de tiempo.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	2
1.1 Problema de ruteo de vehículos	2
1.1.1 Concepto.....	2
1.1.2 Notación.....	2
1.1.3 Modelo VRP.....	4
1.1.4 Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo.....	5
1.2 Métodos heurísticos	8
1.2.1 Algoritmo de ahorros	8
1.2.2 Métodos en dos fases: asignar primero – rutear después	10
1.2.3 Algoritmo del vecino más cercano	13
CAPÍTULO 2. SITUACIÓN ACTUAL.....	14
2.1 Riesgo sísmico de Lima Metropolitana y Callao	14
2.1.1 Peligro sísmico	14
2.1.2 Vulnerabilidad sísmica.....	19
2.2. Estrategias actuales.....	20
2.2.1 Plan de Operaciones de Emergencia (POE)	21
2.2.2 Estructura funcional para la atención de emergencias.....	23
2.2.3 Proyecto Esfera	26
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO	30
3.1 Presentación del escenario crítico	30
3.1.1 Estudios previos	30
3.1.2 Descripción del escenario	33
3.1.3 Población damnificada	34
3.2 Modelo de VRP con ventanas de tiempo (VRPTW).....	37
3.2.1 Justificación del modelo	37
3.2.2 Explicación de los componentes del modelo	38
3.3 Consideraciones para el modelo	45
3.3.1 Depósitos y clústeres	45
3.3.2 Metodología del estudio	46
3.3.3 Supuestos del modelo	54
3.4 Planteamiento del modelo.....	59

3.4.1 Parámetros	59
3.4.2 Modelo en el lenguaje de modelado de LINGO.....	60
3.4.3 Limitaciones del software	62
3.4.4 Elección de la heurística	66
3.4.5 Ruteo con la heurística de dos fases	68
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	71
4.1 Distancia de recorrido	71
4.2 Tiempo de recorrido	73
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
5.1 Conclusiones.....	81
5.2 Recomendaciones.....	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84



ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1. Ejemplo de gráfico de VRP	3
Gráfico 1.2. Ejemplo de solución gráfica de VRP	5
Gráfico 1.3. Ejemplo de gráfico de VRPTW	6
Gráfico 1.4. Lógica del ahorro obtenido	9
Gráfico 1.5. Elección del ángulo inicial	11
Gráfico 1.6. Ejemplo de agrupación por barrido	11
Gráfico 1.7. Ejemplo de solución con método de barrido	13
Gráfico 2.1. Sismicidad en Lima según profundidad	16
Gráfico 2.2. Peligro sísmico en Lima Metropolitana y Callao	17
Gráfico 2.3. Zonas inundables por tsunami en Lima Metropolitana y el Callao	18
Gráfico 2.4. Preparación de emergencias	22
Gráfico 2.5. Respuesta a emergencias	23
Gráfico 2.6. Estructura adaptada del Sistema Comando Incidente	24
Gráfico 3.1. Mapa de almacenes en Lima Metropolitana y Callao	32
Gráfico 3.2. Distribución de damnificados por distritos	37
Gráfico 3.3. Ejemplo acumulación de costos	39
Gráfico 3.4. Elección de un solo camino	40
Gráfico 3.5. Una sola ruta por vehículo	40
Gráfico 3.6. Igual número de vehículos que entran y salen de un nodo	41
Gráfico 3.7. Cada vehículo debe regresar al depósito	41
Gráfico 3.8. Lógica de la secuencia de actividades	42
Gráfico 3.9. Respeto de las ventanas de tiempo	43
Gráfico 3.10. Demanda total de la ruta dentro de la capacidad del vehículo	44
Gráfico 3.11. Ejemplo de solución gráfica de VRPTW	44
Gráfico 3.12. Mapa del clúster con almacén en San Isidro	46
Gráfico 3.13. Mensaje de error por memoria en LINGO	47
Gráfico 3.14. Ejemplo de clúster	48
Gráfico 3.15. Ejemplo de vehículo	49
Gráfico 3.16. Almacén y subestaciones	50
Gráfico 3.17. Cálculo de factor de distancia	55
Gráfico 3.18. Abastecimiento de subestaciones	57
Gráfico 3.19. Abastecimiento de nodos	57
Gráfico 3.20. Ejemplo de nodo en parque	58
Gráfico 3.21. Sets a usar en LINGO	61

Gráfico 3.22. Modelo en LINGO	62
Gráfico 3.23. Duración de corrida según la cantidad de nodos	63
Gráfico 3.24. Comparación de resultados según el número de vehículos	64
Gráfico 3.25. Variación de la función objetivo en el tiempo	65
Gráfico 3.26. Cambio de ejes por traslación	69
Gráfico 3.27. Modelo TSP en LINGO	70
Gráfico 4.1. Ejemplo de rutas en clúster San Borja	72
Gráfico 4.2. Decremento marginal de la duración en Ancón	80
Gráfico 4.3. Decremento marginal de la duración en Ate	80



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Tipos de sismicidad	15
Tabla 2.2. Mayores desastres naturales en Perú según cantidad de muertes	19
Tabla 2.3. Áreas de funciones de respuesta y tareas	25
Tabla 2.4. Número y ubicación de los almacenes de Defensa Civil	29
Tabla 3.1. Resultados por número de almacenes	31
Tabla 3.2. Comparación de resultados	31
Tabla 3.3. Volumen necesario por <i>kit</i>	33
Tabla 3.4. Resumen daño viviendas	34
Tabla 3.5. Población damnificada por distrito	36
Tabla 3.6. División del <i>kit</i>	52
Tabla 3.7. Ajuste de la cantidad de viajes	53
Tabla 3.8. Resumen de la evolución de la función objetivo	65
Tabla 3.9. Resumen de resultados por cada heurística	66
Tabla 3.10. Cálculos para evaluar la hipótesis nula H_{0a}	67
Tabla 3.11. Cálculos para evaluar la hipótesis nula H_{0b}	68
Tabla 3.12. Cálculos para evaluar la hipótesis nula H_{0b}	68
Tabla 4.1. Distancia optimizada de rutas por subestación en kilómetros	73
Tabla 4.2. Duración de la distribución para el clúster de Ancón en horas	74
Tabla 4.3. Duración de la distribución para el clúster de Ate en horas	74
Tabla 4.4. Duración de la distribución para el clúster de Carabayllo en horas	75
Tabla 4.5. Duración de la distribución para el clúster de Chaclacayo en horas	75
Tabla 4.6. Duración de la distribución para el clúster de Cieneguilla en horas	75
Tabla 4.7. Duración de la distribución para el clúster de Comas en horas	75
Tabla 4.8. Duración de la distribución para el clúster de La Molina en horas	75
Tabla 4.9. Duración de la distribución para el clúster de La Victoria en horas	76
Tabla 4.10. Duración de la distribución para el clúster de Lima en horas	76
Tabla 4.11. Duración de la distribución para el clúster de Los Olivos en horas	76
Tabla 4.12. Duración de la distribución para el clúster de Lurigancho en horas	76
Tabla 4.13. Duración de la distribución para el clúster de Pachacámac en horas	77
Tabla 4.14. Duración de la distribución para el clúster de Punta Hermosa en horas	77
Tabla 4.15. Duración de la distribución para el clúster de San Borja en horas	77
Tabla 4.16. Duración de la distribución para el clúster de San Isidro en horas	77

Tabla 4.17. Duración de la distribución para el clúster de San Juan de Lurigancho en horas	78
Tabla 4.18. Duración de la distribución para el clúster de San Martín de Porres en horas	78
Tabla 4.19. Duración de la distribución para el clúster de San Miguel en horas	78
Tabla 4.20. Duración de la distribución para el clúster de Santa Rosa en horas	78
Tabla 4.21. Duración de la distribución para el clúster de Santiago de Surco en horas	78
Tabla 4.22. Duración de la distribución para el clúster de Ventanilla en horas	79
Tabla 4.23. Duración de la distribución para el clúster de Villa María del Triunfo en horas	79



LISTA DE ACRÓNIMOS

APESEG – Asociación Peruana de Empresas de Seguros

CISMID - Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres

ECHO - Oficina de Ayuda Humanitaria de la Comisión Europea

IGP – Instituto Geofísico del Perú

INDECI – Instituto Nacional de Defensa Civil

INEI – Instituto Nacional de Estadística e Informática

OLE – *Object Linking and Embedding*

PNUD – Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

POE - Plan de Operaciones de Emergencia de Lima Metropolitana y Región Callao

PREDES – Centro de Estudios y Prevención de Desastres

SINADECI – Sistema Nacional de Defensa Civil

TSP – *Travel Salesman Problem*

UTM – *Universal Transverse Mercator*

VRP – *Vehicle Routing Problem*

VRPTW – *Vehicle Routing Problem with Time Windows*

INTRODUCCIÓN

Perú pertenece al grupo de países de la zona denominada cinturón de fuego del Pacífico la cual es presenta la mayor actividad sísmica del mundo. Al estar en constante peligro de un sismo de gran magnitud es necesario contar con un plan logístico para brindar de forma oportuna ayuda humanitaria a la población damnificada. En el presente estudio se propondrá un plan de distribución que indique la cantidad de vehículos y qué rutas deberían tomar para la distribución de bienes de ayuda humanitaria no alimentaria tras un terremoto de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao.

En el primer capítulo se definirán conceptos que se usarán a lo largo del estudio, así como la explicación de modelos especializados para este tipo de problemática. Se analizarán las características que cada modelo presenta y la notación científica que usan. Finalmente se presentarán métodos alternativos heurísticos que pueden ser aplicados para solucionar el mismo problema debido a la complejidad computacional que podría presentarse con los métodos exactos.

En el segundo capítulo se mostrará una descripción de la geografía de Lima Metropolitana y Callao y con esto se analizará el riesgo sísmico, teniendo en cuenta también el peligro y la vulnerabilidad, y la urgencia de tener un plan eficiente de contingencia ante una catástrofe de gran magnitud. Se describirá el plan de operaciones de emergencias vigente ante esta situación

En el tercer capítulo se presentará un escenario crítico para determinar la población que resultaría damnificada. Se explorará el comportamiento del modelo exacto aplicado a este caso y se discutirá la alternativa de utilizar heurísticas. Según esto, se desarrollará una estrategia de distribución de bienes de ayuda humanitaria no alimentaria al escenario definido aplicando conceptos de investigación de operaciones.

En el cuarto capítulo se realizará una evaluación cuantitativa de variables como tiempo de respuesta y los kilómetros recorridos en total. Se analizará la posibilidad de reducir el número de vehículos a emplear para la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria

Finalmente, en el quinto capítulo se detallan las conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Problema de ruteo de vehículos

En esta sección se presentará una reseña del problema de ruteo de vehículos, la explicación de la notación empleada y algunos modelos matemáticos de programación lineal entera para formular rutas de vehículos, así como la discusión de la dificultad de resolverlos en un tiempo apropiado con métodos exactos. Finalmente, se presentará algunas heurísticas como alternativa de resolución frente a las limitaciones de los métodos exactos.

1.1.1 Concepto

Se denomina problema de ruteo de vehículos, en adelante VRP (por sus siglas en inglés *Vehicle Routing Problem*), a todo problema relacionado con la distribución de bienes entre depósitos y clientes. Según Toth y Vigo (2002), se busca determinar un grupo de rutas, cada una ejecutada por un solo vehículo que inicia y finaliza el recorrido en un depósito, tal que todos los clientes sean atendidos, las restricciones operacionales satisfechas y el costo global minimizado.

Generalmente, este problema es descrito en un gráfico cuyos arcos representan caminos y los vértices indican la ubicación del depósito y los clientes. Toth y Vigo afirman que cada cliente tiene un requerimiento de bienes, los cuales deberán ser repartidos por una flota de vehículos, cuya cantidad y capacidad de carga son parámetros del problema. Cada arco se asocia a un costo, el cual generalmente representa la distancia entre nodos, o el tiempo que demora trasladarse de un punto a otro.

Los primeros en dar una aplicación real al VRP fueron Dantzig y Ramser (1959). Buscaron optimizar el ruteo de una flota de camiones repartidores de gasolina a un gran número de estaciones de servicio, partiendo de un depósito central. En este caso los vértices representan el depósito y cada una de las estaciones de servicio a las que se debe abastecer, mientras que los arcos representan la distancia entre cada uno de estos nodos.

1.1.2 Notación

En esta sección se presentará una definición formal de la notación empleada en el modelo básico de VRP para poder entender su formulación, con base en la notación empleada por Toth y Vigo (2002). Este modelo propone considerar un solo depósito y un conjunto de clientes a ser atendidos por un conjunto de vehículos para lograr satisfacer una demanda dada (Laporte, Mercure y Nobert, 1986).

Toth y Vigo refieren que la base de todo el problema es un gráfico completo definido por $G = (V, A)$, donde $V = (0, 1, 2, \dots, n)$ es el conjunto de vértices y A es el conjunto de arcos posibles. Los vértices $i = 1, 2, \dots, n$ corresponden a los clientes, que a su pertenecen al subconjunto N ; mientras que el vértice 0 corresponde al depósito. En ocasiones, dependiendo del problema, se denomina adicionalmente al depósito como vértice $(n+1)$. Para cada vértice i , existe un conjunto $\Delta^+(i)$ de vértices j que pueden ser alcanzados desde i , cuyo arco (i, j) pertenece al conjunto A . Análogamente, $\Delta^-(i)$ es el conjunto de vértices j desde los cuales se puede llegar a i , tal que el arco (j, i) debe pertenecer al conjunto A . En el gráfico 1.1 se muestra un gráfico el cual tiene cinco clientes y un depósito. Se puede apreciar también 15 arcos los cuales podrán ser transitados o no, según los circuitos que se decidan tomar.

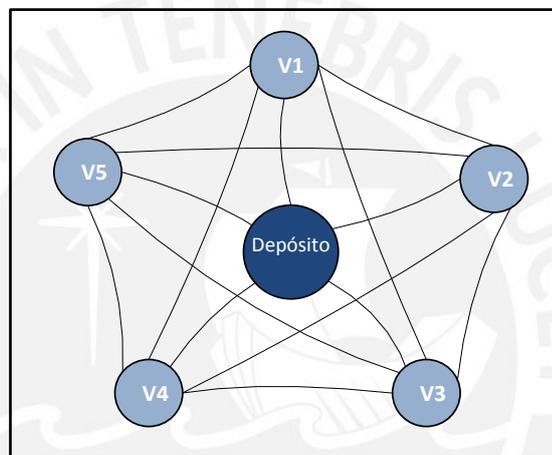


Gráfico 1.1. Ejemplo de gráfico de VRP
Elaboración propia

Para cada arco (i, j) que pertenece al conjunto A , existe un costo no negativo asociado c_{ij} que representa el costo por haber ido del vértice i al vértice j . Este costo asignado es el mínimo posible entre dos vértices, es por esto que satisface que $c_{ik} + c_{kj} \geq c_{ij}$. Para evitar bucles del tipo (i, i) en el sistema, se define el costo $c_{ii} = +\infty$ para todo i que pertenece al conjunto V . En el caso en que $c_{ij} = c_{ji}$, el problema se denomina simétrico; caso contrario, asimétrico. Cada cliente $i=1, 2, \dots, n$ tiene una demanda asociada d_i que debe ser satisfecha, mientras que el depósito tiene una demanda ficticia $d_0 = 0$. Dado un conjunto de vértices S , incluido en V , entonces $d(S) = \sum_{i \in S} d_i$ es la demanda total del conjunto.

En el depósito se encuentra disponible un conjunto de K vehículos idénticos, cada uno con capacidad C . Una de las condiciones para que el modelo sea factible es que $d_i \leq C$ para cada $i = 1, 2, \dots, n$. Cada vehículo tiene permitido hacer solo una ruta, partiendo del depósito, esto hace que el modelo encuentre un conjunto de exactamente K circuitos, al menor costo posible, y debiendo de llegar a todos los

clientes. Se puede presentar una variante en la cual los vehículos disponibles son distintos, es decir, tienen distintas capacidades $C_k = 1, 2, \dots, n$.

1.1.3 Modelo VRP

En esta sección se mostrará el modelo básico de programación de un VRP y se explicará cada restricción. Dicho modelo está basado en la publicación de Toth y Vigo (2014), y tiene la siguiente función objetivo:

$$\text{Min} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} C_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = |K| \quad (4)$$

$$\sum_{i \notin S} \sum_{j \in S} x_{ij} \geq r(S) \quad \forall S \subseteq N, S \neq \emptyset \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V \quad (6)$$

Cabe indicar que x_{ij} es una variable binaria que vale 1 cuando por el arco (i, j) circula un vehículo, o cero en caso contrario. La función objetivo mostrada en (1) representa el costo total del recorrido, y el modelo buscará que sea el menor monto posible. La restricción (2) indica que cada cliente debe ser atendido solo por un vehículo y también garantiza que todos los clientes sean atendidos, mientras que la restricción (3) impone que el vehículo deberá partir de dicho cliente y seguir con su ruta. La restricción (4) indica que un número K de vehículos parten del depósito y que esta misma cantidad deberá retornar finalizando sus rutas. La restricción (5) impone los requerimientos de capacidad de carga para cada ruta. Finalmente, la restricción (6) define al modelo como uno entero binario.

En el gráfico 1.2 se ejemplifica cómo sería una solución obtenida con el modelo descrito. En este ejemplo se definen dos circuitos $(V5-V1)$ y $(V4-V3-V2)$, es decir se necesitarán dos vehículos para poder satisfacer a los cinco clientes y cumplir con todas las restricciones descritas.

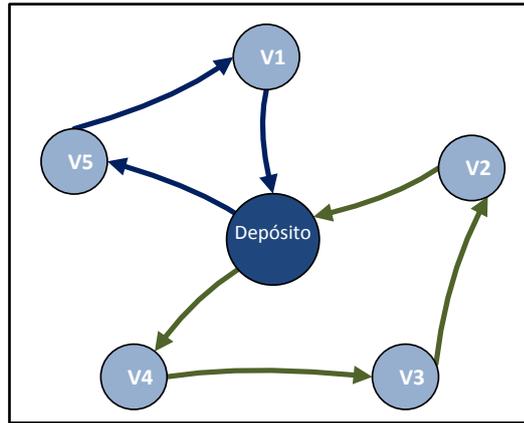


Gráfico 1.2. Ejemplo de solución gráfica de VRP
Elaboración propia

1.1.4 Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo

El problema de rutas de vehículos con ventanas de tiempo, de ahora en adelante VRPTW (por sus siglas en inglés *Vehicle Routing Problem with Time Windows*), es una de las extensiones de un VRP en el cual se consideran restricciones adicionales referentes a intervalos de tiempo para cada cliente. Desrochers, Lenstra, Savelsbergh y Soumis (1988) lo define como un grupo de vehículos que se encuentran localizados en un depósito y debe servir a un conjunto de clientes geográficamente dispersos, cada vehículo cuenta con una capacidad dada y cada cliente tiene una demanda asociada, la cual tiene que ser satisfecha dentro de un horario específico buscando minimizar el costo total del viaje.

En la publicación de Toth y Vigo (2002), indica que las ventanas de tiempo denominadas suaves son las que pueden ser violadas pagando un costo como penalidad, mientras que las ventanas de tiempo duras no permite que ningún vehículo llegue pasada la última hora para que empiece el servicio. En caso el vehículo llegue antes de que el cliente esté listo para recibir el servicio, este tendrá que esperar.

La notación a emplear será la propuesta por Toth y Vigo (2002) para poder luego desarrollar el modelo básico de VRPTW. Del mismo modo que en un VRP simple, se parte de un gráfico $G = (V, A)$ donde el depósito es representado por dos nodos $i = 0$ e $i = n+1$. Del mismo modo, se tiene un conjunto $N = V \setminus \{0, n+1\}$ el cual agrupa solo los clientes, y excluye a los nodos correspondientes al depósito, es decir 0 y $n+1$. Cada cliente i está asociado a un intervalo de tiempo $[a_i, b_i]$ llamado ventana de tiempo, donde a_i representa el momento en el que el cliente i está preparado para recibir el servicio, y b_i el instante máximo en el cual el cliente i podrá empezar a recibir el servicio.

En el gráfico 1.3 se muestra un ejemplo de cómo sería un gráfico $G = (V, A)$ para VRPTW de cinco clientes y un depósito. Se observan todas las rutas posibles y las ventanas de tiempo asociadas a cada cliente, las cuales se muestran de distinta amplitud y deben ser respetadas al momento de brindar el servicio.

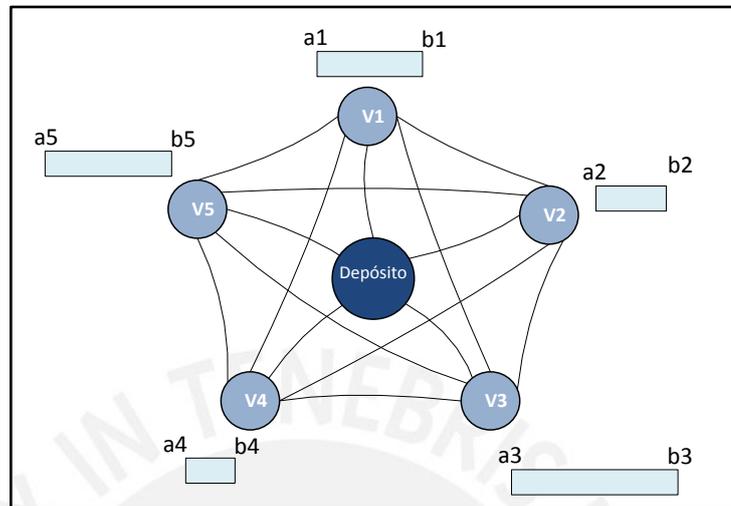


Gráfico 1.3. Ejemplo de gráfico de VRPTW
Elaboración propia

Los parámetros del VRPTW son el tiempo que demora en recorrer el arco (i, j) denominado t_{ij} , las ventanas de tiempo $[a_i, b_i]$, así como el tiempo que durará brindar el servicio al cliente i denotado por s_i . Cabe resaltar que mientras se está brindando el servicio, el vehículo debe permanecer estacionado hasta que termine esta actividad. Si se presenta el caso en el que el vehículo k llegue al cliente i antes del instante de tiempo a_i , el vehículo deberá esperar hasta que ya se pueda brindar el servicio correspondiente.

También, según Toth y Vigo (2002), los nodos que representan al depósito también tienen asociados una ventana de tiempo $[a_0, b_0] = [a_{n+1}, b_{n+1}] = [E, L]$, donde E representa el instante de tiempo más temprano para que los vehículos partan del depósito, mientras que L indica la llegada más tarde posible al nodo. Para estos nodos también se le asigna una demanda y tiempo de servicio igual a cero, es decir $d_0 = d_{n+1} = s_0 = s_{n+1} = 0$. Similar al caso básico de VRP, se emplea la variable x_{ijk} , para determinar si por el arco (i, j) circula el vehículo k o no. Agrega la variable w_{ik} que indica el inicio del servicio brindado al cliente i , mientras lo visita el vehículo k . Como en el caso del VRP, existe un conjunto $\Delta^+(i)$ de vértices j que pueden ser alcanzados desde i ; mientras que $\Delta^-(i)$ es el conjunto de vértices j desde los cuales se puede llegar a i .

A continuación se mostrará el modelo básico de programación de un VRPTW y se explicará brevemente. Cada restricción será explicada de manera detallada en el capítulo 3. El modelo de programación lineal entera mixta propuesto por Cordeau, Desaulniers, Desrosiers, Solomon y Soumis (2000) es el siguiente.

Función objetivo:

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \Delta^+(0)} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{ijk} - \sum_{i \in \Delta^+(j)} x_{jik} = 0 \quad \forall j \in N, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(n+1)} x_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$x_{ijk}(w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk}) \leq 0 \quad \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (6)$$

$$a_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \leq w_{ik} \leq b_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \quad \forall i \in N, k \in K \quad (7)$$

$$E \leq w_{ik} \leq L \quad \forall k \in K, i \in \{0, n+1\} \quad (8)$$

$$\sum_{i \in V} d_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \leq C \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (10)$$

$$w_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in N, k \in K \quad (11)$$

Toth y Vigo explica el modelo así: la función objetivo (1) expresa el costo total. La restricción (2) limita que a cada cliente i se le asigne solo un vehículo k , mientras que las restricciones (3), (4) y (5) indican las características de la ruta a seguir por cada vehículo k . La restricción (6) define la lógica de secuencia del servicio en términos de tiempo. Cabe resaltar que es una restricción no lineal por lo que deberá ser modificada en el capítulo 3. Las restricciones (7) y (8) garantizan la factibilidad con respecto a las ventanas de tiempo dadas; en particular la restricción (9) garantiza que cada vehículo k tenga la capacidad suficiente para satisfacer todas las demandas de los clientes involucrados en el circuito que le corresponda. La restricción (10) define

la variable x_{ijk} como binaria y la restricción (11) indica que el rango de existencia de w_{ik} es no negativo.

Este modelo considera que todos los vehículos son idénticos, es decir, tienen la misma capacidad y la cantidad de vehículos a utilizar es ilimitada. Existen variantes de este tipo de problema que consideran una flota heterogénea de vehículos, de distintas capacidades; cantidad de vehículo que se puede usar como máximo; costos fijos asociados al uso de cada vehículo; o costos variables asociados al traslado de un vehículo de un punto a otro.

1.2 Métodos heurísticos

Según Dantzig y Ramser (1959) los VRP son clasificados como problemas *NP-hard*, pues es muy difícil resolverlos, así, un VRP con solo un vehículo y 15 clientes que abastecer, tendría más de seiscientos mil millones de rutas posibles. Esto se complica más al aumentar el número de vehículos, clientes y al darle la complejidad de cumplir con ventanas de tiempo. Debido a la complejidad de los VRP, solo problemas con pocos clientes, hasta aproximadamente 50 según Toth y Vigo (2002), pueden ser resueltos eficientemente por métodos exactos.

Para solucionar esto, se han desarrollado numerosos métodos heurísticos que son procedimientos que buscan obtener una solución factible muy buena, pero no garantiza que sea la óptima al problema en cuestión (Hillier, 2010). En esta sección se describirán los métodos heurísticos clásicos como el algoritmo de ahorros, el método de dos fases y el algoritmo del vecino más cercano.

1.2.1 Algoritmo de ahorros

Uno de los algoritmos más difundidos para los VRP es el algoritmo de ahorros de Clarke y Wright (1964). La heurística presentada en esa publicación propone un procedimiento para obtener una solución óptima o una bastante cercana a la óptima, de manera rápida, la cual se describirá a continuación.

Según Clarke y Wright (1964), el principio básico en esta heurística es la del ahorro que es la disminución en distancia obtenida al crear nuevas rutas con base en la activación de un arco. Por ejemplo, sea una red con vértices P_0 , que representa el depósito, y P_i que representan los clientes, con dos puntos P_y y P_z unidos a $P_{y\pm 1}$ y $P_{z\pm 1}$ respectivamente, como se muestra en la parte (a) del gráfico 1.4. Los puntos P_y y P_z pertenecen a rutas distintas y se evaluará el ahorro obtenido al unir dichos vértices. Las partes (b), (c), (d) y (e) del gráfico 1.4 ilustran las cuatro posibles descomposiciones de las rutas debido a la unión de los puntos P_y y P_z . El ahorro

obtenido en cada uno de estos casos con respecto a la posición inicial (a) es el siguiente:

(b) $d_{y,y+1} - d_{0,y+1} + d_{z,z+1} - d_{0,z+1} - d_{y,z}$

(c) $d_{y-1,y} - d_{0,y-1} + d_{z,z+1} - d_{0,z+1} - d_{y,z}$

(d) $d_{y,y+1} - d_{0,y+1} + d_{z,z-1} - d_{0,z-1} - d_{y,z}$

(e) $d_{y-1,y} - d_{0,y-1} + d_{z,z-1} - d_{0,z-1} - d_{y,z}$

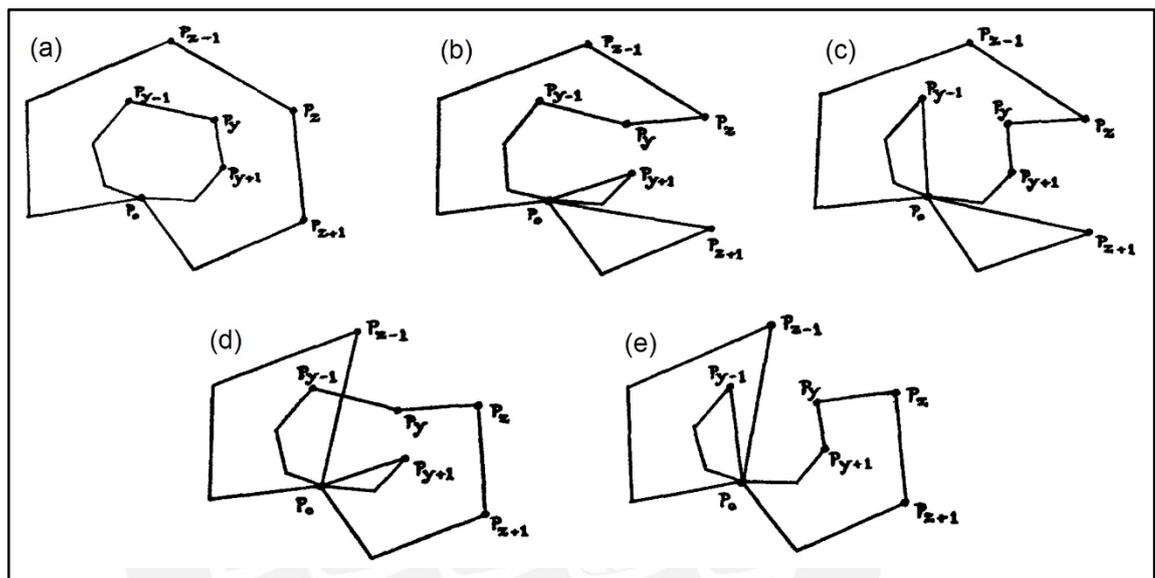


Gráfico 1.4. Lógica del ahorro obtenido

Fuente: Clarke y Wright (1964)

El máximo ahorro obtenido se selecciona siempre y cuando cumpla con la factibilidad operacional de carga, caso contrario se pasa al siguiente. Una vez unidos estos dos puntos se deberán recalcular los ahorros. Si un punto está unido a otros dos, sin contar P_0 , no deberá ser considerado para posibles uniones. Para tener una solución inicial factible se considera que cada ruta visita un único cliente y regresa al depósito. Luego de esto se calculará el ahorro para cada arco posible y se realizará el procedimiento descrito. Esto se repetirá hasta que ya no se encuentren ahorros positivos. El tiempo que tarda este algoritmo puede incrementar pues todos los ahorros deben ser calculados y almacenados. Es por esta razón que Toth y Vigo (2002) recomienda tener en cuenta la determinación del máximo ahorro y los requerimientos de almacenamiento de información.

Una extensión de este método es el propuesto por Solomon (1987) para aplicarlo al VRPTW, ya que el algoritmo para VRP no considera el arribo de los vehículos a los clientes, y esto podría violar algunas ventanas de tiempo. El procedimiento inicia de

la misma manera asignando un vehículo a cada cliente y luego calcular los ahorros en cada arco. Debido a la presencia de ventanas de tiempo, al escoger el arco de mayor ahorro se deberá tener en cuenta la orientación, así como la de capacidad de carga. Por ejemplo si se tiene un arco activo que va del nodo A al nodo B, y otro arco activo que va del nodo C al D, las únicas posibilidades de unirse serían activando el arco BC o el arco DA. En este ejemplo también debe cumplir que la cantidad demandada por estos cuatro nodos no sea mayor que la capacidad de carga del vehículo. Otro factor a tener en cuenta es lo que denomina PF. Este tiempo PF (por sus siglas en inglés *push forward*) mide cuánto se desplaza el tiempo de arribo con respecto a su valor original. Si el tiempo de arribo al cliente i se incrementa en PF_i , el tiempo de arribo a los demás clientes posteriores se incrementará en PF_j .

1.2.2 Métodos en dos fases: asignar primero – rutear después

Es una heurística popularizada por Gillett y Miller (1974) que obtiene una solución factible cercana a la óptima rápidamente para mediana y gran escala. Este método divide el procedimiento en dos etapas. En una primera instancia busca agrupar clientes en clústeres, respetando las restricciones de capacidad de carga de los vehículos, los cuales pertenecerán a una misma ruta. Finalizada esta etapa, se procederá a crear una ruta que minimice la distancia total recorrida para cada clúster.

Uno de los métodos más elementales es el de barrido que consiste en formar agrupaciones factibles de clientes al rotar un radio con centro en el depósito, para luego crear una ruta para cada agrupación. Gillett y Miller (1974) indican que se debe fijar el depósito con coordenadas $(0,0)$ y que los demás vértices i están representados por sus coordenadas polares (θ_i, ρ_i) que indican el ángulo y la longitud de radio respectivamente.

Asignar el valor de cero al ángulo de un cliente arbitrario y luego realizar lo que Pardalos, Migdalas y Burkard (2002) resume en los siguientes pasos:

Paso 1. Escoger un vehículo k que no esté siendo usado.

Paso 2. Empezar por el vértice sin ruta con el menor ángulo y asignarlo al grupo del vehículo k . Asignar los siguientes vértices de menor ángulo sin exceder la capacidad de carga del vehículo. Cuando ya no se pueda asignar el vértice siguiente por exceder el límite de carga, no incluirlo y cerrar el grupo. Si aún quedan vértices sin grupo, repetir el Paso 1.

Los gráficos 1.5 y 1.6 ilustran los pasos 1 y 2 para un ejemplo con 18 nodos y capacidad del vehículo para atender a seis nodos por ruta.

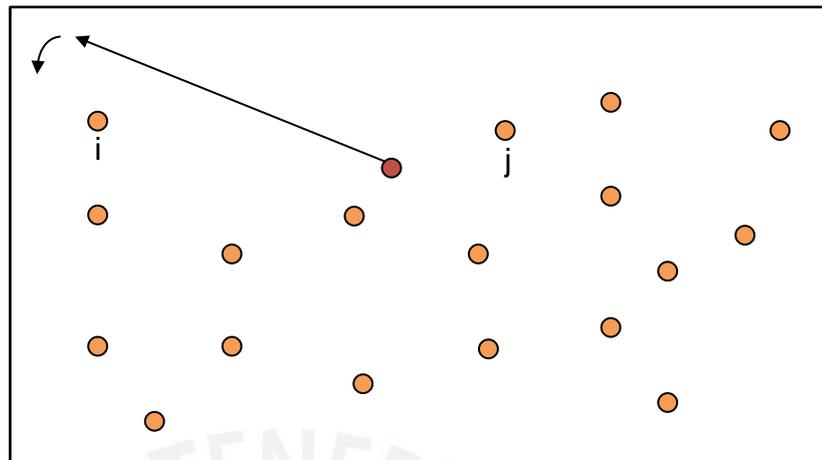


Gráfico 1.5. Elección del ángulo inicial
Elaboración propia

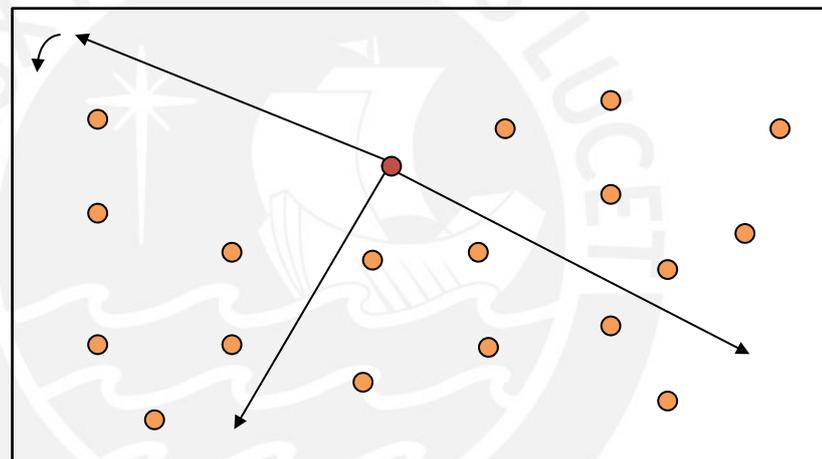


Gráfico 1.6. Ejemplo de agrupación por barrido
Elaboración propia

Paso 3. Cuando ya todos los clientes estén agrupados en clústeres, se obtendrá una ruta óptima para cada clúster por separado. Estas rutas pueden ser optimizadas resolviendo el TSP correspondiente.

El TSP o problema del agente viajero (por sus siglas en inglés *Traveling Salesman Problem*) recibió este nombre porque podría describirse como un agente de ventas que debe visitar un grupo de ciudades en un solo viaje, debiendo comenzar y terminar el recorrido en su ciudad de residencia y visitando una sola vez cada ciudad de manera que se minimice la longitud total de viaje (Hillier, 2010). En otras palabras, el TSP se podría tomar como un VRP en el cual se dispone solo de un vehículo. Miller, Tucker y Zemlin (1960) propone un modelo de programación lineal entera mixta que según la notación usada en el punto 1.1 sería el siguiente.

Función objetivo:

$$\text{Min} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} C_{ij} x_{ij} \quad i \neq j \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (3)$$

$$u_i - u_j + n x_{ij} \leq n - 1 \quad 1 \leq i \neq j \leq n \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V \quad (5)$$

$$u_i \in \mathbb{Z} \quad \forall i \in N \quad (6)$$

Donde N es el conjunto de clientes por visitar, no incluye el depósito o “nodo base 0” desde donde se parte, mientras que V es el conjunto $N \cup \{0\}$. Las restricciones (2) y (3) indican al modelo que todos los clientes sean visitados una vez y la restricción (4) es la encargada de garantizar que no se generen *subtours*. La variable u_i representa el acumulado de clientes a los que ya ha visitado al partir del nodo i . En otras palabras, si el vehículo se dirige del nodo i al nodo j , $x_{ij}=1$, se debe cumplir la restricción $u_i - u_j = -1$. Caso contrario, siempre debe cumplirse que $u_i - u_j = n - 1$, donde n es el número de clientes visitados en la ruta. El gráfico 1.7 ejemplifica una solución empleando este método en la cual se generaron cuatro grupos de clientes y luego se realizó la ruta óptima para cada caso utilizando el modelo TSP.

Para este algoritmo de dos fases, Solomon (1987) propuso una extensión para poder resolver el VRPTW. Los pasos 1 y 2 se realizan como si fuese un VRP, sin embargo el paso 3 implica generar rutas aplicando la heurística de inserción secuencial para VRPTW. Para detalles sobre esta heurística consulte Mole y Jameson (1976). Por esta razón algunos clientes dentro del clúster quedarán fuera de la ruta. Los clientes incluidos en la ruta se eliminan de problema, mientras que los demás permanecerán para ser considerados en las siguientes iteraciones.

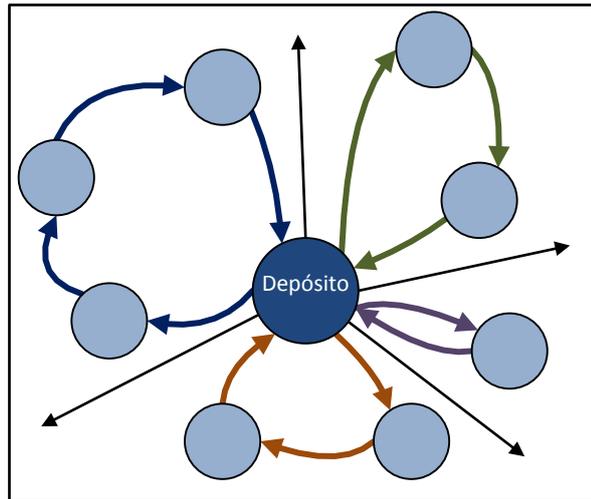


Gráfico 1.7. Ejemplo de solución con método de barrido
Elaboración propia

1.2.3 Algoritmo del vecino más cercano

La heurística del vecino más cercano o denominado también como NN, por sus siglas en inglés *nearest neighbor* es un modelo estudiado por Reinelt (1994) donde explica que el TSP es un tipo de problema que puede ser solucionado empleando la heurística NN, que consiste en elegir un nodo al azar y a partir de dicho punto armar una ruta siguiendo el nodo más cercano.

Adicionalmente, Labadie, Prins y Prodhon (2016) plantea una adaptación de la heurística para solucionar un VRP pues considera trazar más de una ruta, considerando la demanda de cada uno de los nodos de clientes y capacidad de la unidad de transporte a manera de cumplir con los requerimientos de cada visita sin superar el límite del vehículo y sin repetir los nodos ya visitados. Este método puede resumirse en los siguientes pasos:

- Paso 1. Definir la capacidad del vehículo que se utilizará.
- Paso 2. Definir la demanda de los nodos a visitar.
- Paso 3. Definir una base de partida (depósito, almacén, etc).
- Paso 4. Visitar el nodo más cercano y cumplir con la demanda del local.
- Paso 5. Repetir el paso 4 hasta alcanzar el límite de la capacidad del vehículo.
- Paso 6. Volver a la base para abastecer y repetir el proceso desde el paso 4 sin repetir los clientes ya visitados hasta que todos los clientes hayan sido visitados.

CAPÍTULO 2. SITUACIÓN ACTUAL

2.1 Riesgo sísmico de Lima Metropolitana y Callao

Según el SINADECI (2004), un peligro es la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, en un período dado, en una zona conocida; por ejemplo, un terremoto de gran magnitud. Por otro lado, la vulnerabilidad es el grado de susceptibilidad de un elemento frente a la probable ocurrencia de un peligro, expresado en porcentaje. Combinando estos dos conceptos se obtiene un riesgo, que es la estimación de probables pérdidas y daños que sufrirá un elemento expuesto al impacto de un peligro. En esta sección se detallarán estos dos conceptos en la realidad de Lima Metropolitana y Callao para tener una panorámica de cuál es el riesgo sísmico actual de la capital del Perú.

2.1.1 Peligro sísmico

Perú se encuentra localizado en una zona de alta sismicidad, denominada “Cinturón de Fuego del Pacífico”, en la cual se registra aproximadamente el 85% de los movimientos sísmicos a nivel mundial, por tal razón se afirma que el Perú está expuesto permanentemente a la ocurrencia de terremotos. Se tiene registro de sismos en el Perú que han alcanzado intensidades de grado XI en la escala Escala Modificada de Mercalli en la zona del volcán Misti (INDECI, 2006), lo cual tiene clasificación de catastrófico como se detalla en el anexo 1. Este sismo ocurrió en el año 1600 en la ciudad de Arequipa y se desplomaron todos los edificios, con excepción de los más pequeños. Por otro lado, en un lapso de 325 años, desde 1552 hasta 1877, se tiene registro de catorce sismos de gran magnitud, de los cuales por lo menos seis fueron mayores de 8° en la escala de Richter (SINADECI, 2004).

La superficie de Lima Metropolitana representa el 0.22% del territorio peruano; sin embargo concentra el 32% de la población nacional. Se sitúa en la costa del país, y en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, frente al Océano Pacífico. Según Kuroiwa (2002), la capital peruana ha sido sacudida por sismos destructivos en 1908, 1932, 1940, 1966 y 1974, cuyas magnitudes varían entre 7° y 8.2° en la escala de Richter. Sin embargo, en todas estas ocasiones, la zona más afectada ha sido el distrito de La Molina, situada en una quebrada al este del valle Rímac. Así por ejemplo, en 1974, la intensidad para el centro del valle fue de VI-VII MM., mientras que en La Molina llegó a IX MM.

Según el IGP (2008), se tienen cuatro niveles de sismicidad dependiendo de la profundidad y el medio en el cual se desarrolla como se ilustra en el gráfico 2.1 y que

se detallan en la tabla 2.1. Se puede observar que el tipo de sismicidad más peligrosa es la superficial, y que en el área de Lima Metropolitana y Callao presenta cuatro focos de este tipo.

Tabla 2.1. Tipos de sismicidad

Tipo de sismicidad	Descripción
Superficial	Es la actividad sísmica del ambiente colisión-subducción, con menos de 33 kilómetros de profundidad. Los sismos de magnitudes moderadas o mayores pueden llegar a causar fallas geológicas con desplazamiento de varios metros de terreno a lo largo de las zonas de fallo.
Intermedia superficial	La capa más activa, con más de 33 kilómetros y menos de 70. No producen fallas en la superficie terrestre, pero sí vibraciones violentas. Tiene penetraciones leves por debajo del continente en el ámbito del departamento de Lima.
Intermedia profunda	Sismos con profundidades entre 71 y 150 kilómetros que tampoco produce fallas en la superficie terrestre. Son sismos de gran magnitud, con sacudimientos violentos y afectan una extensa área.
Profunda	Sismos ocurridos entre 151 y 300 kilómetros de profundidad. Producen vibraciones de menos frecuencia en la superficie que los sismos de capas superiores. Estos sismos tampoco producen fallas en la superficie del terreno.

Fuente: IGP (2008)
Elaboración propia

El CISMID/APESEG (2005) realizó un estudio de microzonificación sísmica en el cual lograron distinguir cinco zonas correspondientes a suelos con distintas propiedades. La primera zona está conformada por suelo rocoso el cual tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural lo cual tiene un peligro sísmico bajo. La segunda zona corresponde a suelos granulares finos y arcillosos. Subyaciendo a estos estratos se encuentra la grava aluvial o coluvial, con un peligro sísmico relativamente bajo. La tercera zona está conformada en su mayor parte por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor, que se encuentran en estado suelto con un alto peligro sísmico. La cuarta zona es la conformada por depósitos de arenas eólicas de gran espesor y sueltas, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. Es una zona que presenta suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables por lo que la peligrosidad sísmica es muy alta. Finalmente, se tiene la quinta zona conformada por depósitos de rellenos sueltos de desmontes heterogéneos que han sido colocados en depresiones naturales o excavaciones realizadas en el pasado. Similar a la cuarta zona, el peligro sísmico es muy alto. El gráfico 2.2 ilustra cómo

están distribuidas las zonas mencionadas en Lima Metropolitana con el detalle del tipo de suelo por sector urbano en Lima Metropolitana y Callao en el Anexo 2.

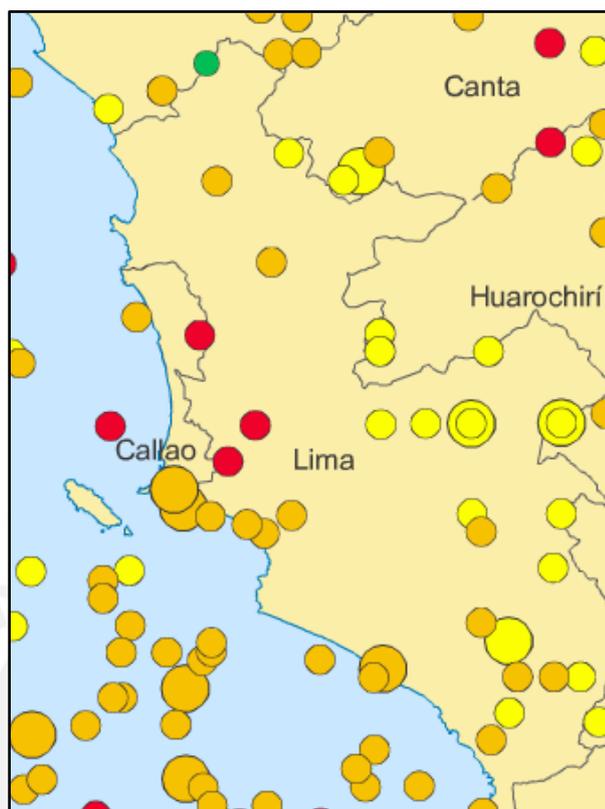


Gráfico 2.1. Sismicidad en Lima según profundidad
Superficial (rojo), Intermedia superficial (naranja), Intermedia profunda (amarillo),
Profunda (verde)
Fuente: IGP (2008)

Además del peligro inminente de la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, el Océano Pacífico está estructural, topográfica y sísmicamente condicionado para ser un sistema generador de tsunamis. Por ejemplo, el 28 de octubre de 1746 ocurrió un terremoto en el mar frente a Lima, lo cual originó un devastador tsunami, el cual acabó con la vida de 3 800 pobladores, de un total de 4 000 (SINADECI, 2004).

Con ayuda de un modelo matemático denominado *Tsunami Inundation Modelling Exchange* (TIME), desarrollado por la escuela japonesa y ejecutado por un equipo de peruanos y franceses del PNUD, se permitió simular los efectos de un tsunami tras un sismo de magnitud 8.5 Mw con epicentro frente a Callao. La altura de la ola y el tiempo de llegada para algunos lugares de la costa son: Ventanilla 7.5m y 21 minutos, Callao 7.0m y 20 minutos, Villa 6.5m y 16 minutos, Lurín 7.0m y 19 minutos (INDECI, 2010).

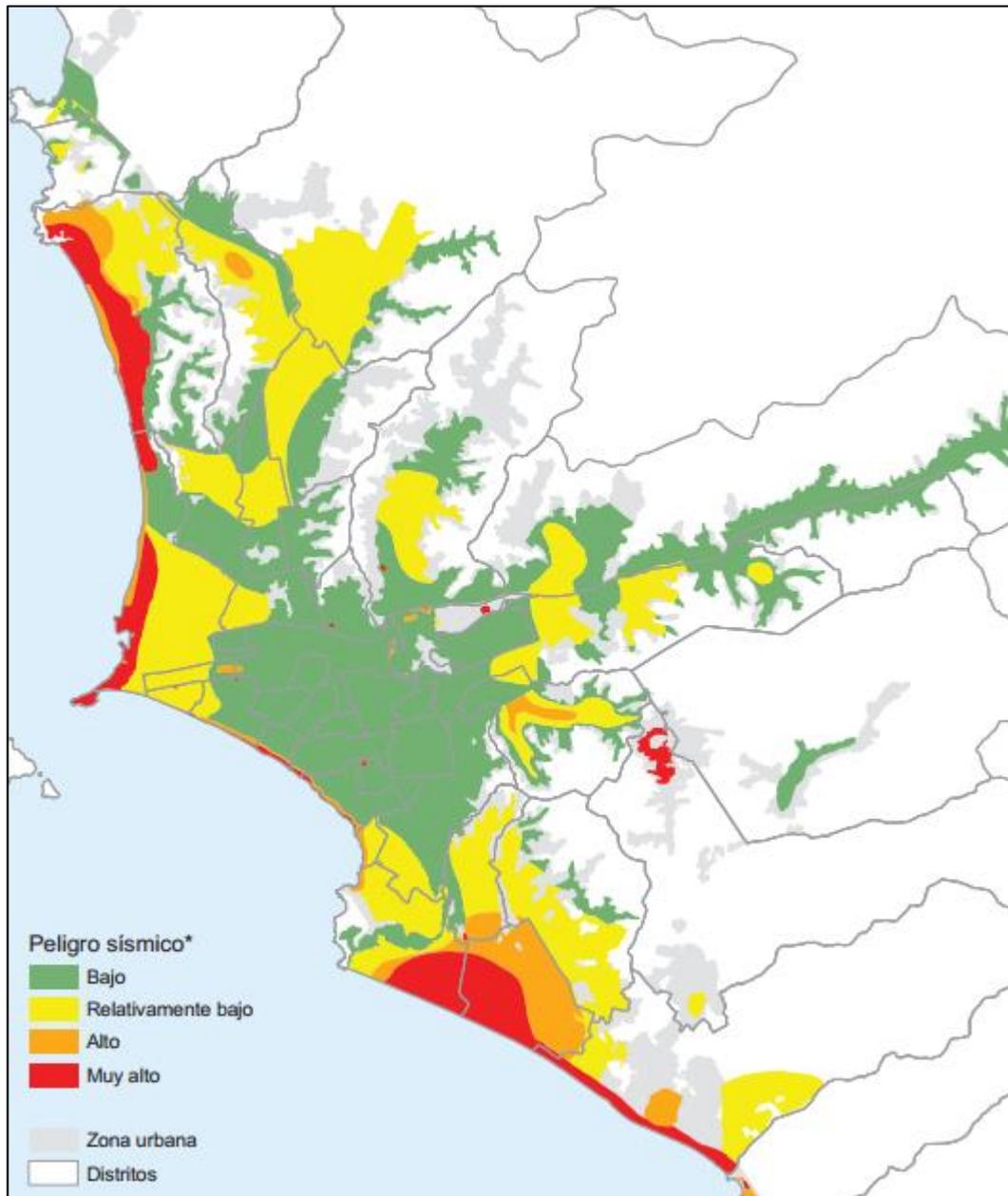


Gráfico 2.2. Peligro sísmico en Lima Metropolitana y Callao

Fuente: CISMID (2005)

El gráfico 2.3 muestra el resultado global de la investigación, teniendo como escenarios un evento de 8.5Mw, el más probable representado de color rojo, y un evento de 9Mw, el peor escenario con el color naranja.

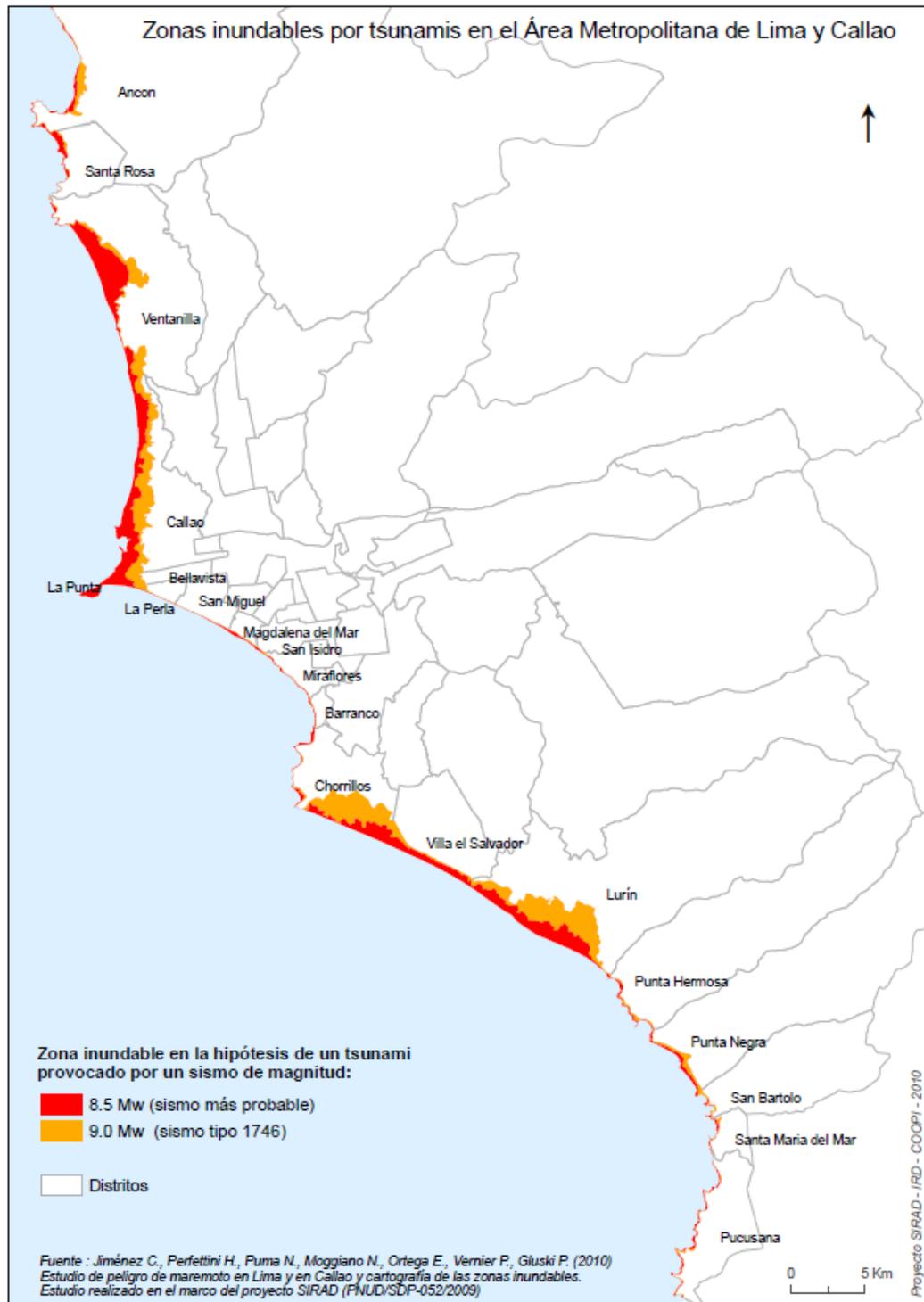


Gráfico 2.3. Zonas inundables por tsunami en Lima Metropolitana y el Callao

Fuente: INDECI (2010)

Con base en el panorama descrito, podemos afirmar que existe una alta probabilidad que en Lima suceda un sismo de gran magnitud, afectando a la sociedad dependiendo del tipo de suelo de la zona y con la probabilidad de generar un tsunami que inundaría partes de Lima.

2.1.2 Vulnerabilidad sísmica

En el contexto sísmico, según SINADECI (2009), se entiende como vulnerabilidad al grado de resistencia que tiene una sociedad ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, en otras palabras la facilidad que tiene un elemento de sufrir daños ante la exposición de un peligro. La vulnerabilidad dependerá de factores como físico-estructurales, económicos, sociales, políticos, ambientales, educacionales, entre otros. La reducción de las consecuencias que tenga un desastre incluye medidas de prevención para reducir la vulnerabilidad de los elementos expuestos a un peligro potencial.

Un ejemplo claro es el terremoto ocurrido en Ancash, el 31 de mayo de 1970, el cual tuvo una magnitud de 7.8° en la escala de Richter y fue el sismo con mayor grado de destrucción del siglo XX. En la tabla 2.2 figura como primero en la lista de desastres naturales con mayor número de muertes en el período entre 1900 al 2014 en Perú. Además de esta terrible cifra, el terremoto causó 150 000 heridos, 800 000 personas sin hogar, 2 000 000 personas afectadas, un 95% de viviendas de adobe destruidas, y pérdidas que actualizadas se estiman en 2 000 millones de dólares. En este ejemplo la población fue altamente vulnerable, pues no tuvo las herramientas necesarias para hacer frente a un terremoto de esta magnitud.

Tabla 2.2. Mayores desastres naturales en Perú según cantidad de muertes

Desastre	Fecha	Cantidad de muertos
Terremoto	31/05/1970	66,794
Epidemia	18/08/1991	8,000
Movimiento de masa húmeda	01/12/1941	5,000
Movimiento de masa seca	10/01/1962	2,000
Epidemia	31/01/1991	1,726
Terremoto	10/11/1946	1,400
Epidemia	01/01/1992	690
Movimiento de masa húmeda	18/03/1971	600
Terremoto	15/08/2007	593

Fuente: EMDAT (2014)

Elaboración propia

En 1746, Lima y Callao tenían 60 000 habitantes de los cuales casi 10 000 murieron tras el efecto combinado de terremoto-tsunami, siendo la zona más afectada el Callao que perdió el 98% de su población. En Perú, por los atributos descritos, es inevitable la ocurrencia de terremotos de gran magnitud. En promedio cada tres años se registra un sismo mayor a 7° en la escala de Richter, sin embargo aún no se repite uno de magnitud similar al de 1746. Lima Metropolitana y Callao cuentan con una vulnerabilidad física menor que en siglo XVIII, pero socialmente la misma o mayor

debido al aumento de la población. A continuación se detallará la vulnerabilidad en algunos sectores en el caso de que ocurriese un terremoto según SINADECI (2004):

- Sector vivienda

La tipología de las construcciones en los grandes centros urbanos, como el de Lima Metropolitana y Callao, predomina la albañilería no reforzada y la reforzada con concreto armado, especialmente en áreas urbanas modernas. Los factores que contribuyen a la vulnerabilidad del sector vivienda se tiene: la densidad de muros, antigüedad de la edificación, vicios de diseño como la presencia de columnas cortas, entre otros.

- Sector salud

La vulnerabilidad sísmica tiene estrecha relación con la infraestructura física, las edificaciones, equipamiento de laboratorio y población usuaria de estos ambientes. En términos generales, la estructura física de un hospital responde razonablemente a intensidades macrosísmicas de 6 MSK, presentando daños en intensidades mayores. La principal vulnerabilidad en este sector se encuentra en la capacidad de atención a los pacientes porque luego de un desastre se satura la capacidad hospitalaria.

- Sector energía

El sector energético depende principalmente de la generación hidroeléctrica en terrenos alejados de centros poblados. Sin embargo, los canales que conducen el recurso hídrico a las plantas hidroeléctricas y las líneas de transmisión de alto voltaje son vulnerables a la ocurrencia de actividad sísmica y dejar sin suministro eléctrico a la población por un período de tiempo prolongado.

La evidencia hasta aquí expuesta, revela un panorama de la vulnerabilidad que presenta Lima Metropolitana y Callao. La vida y la salud de la población están en riesgo directo ante los efectos destructivos de un peligro. Gran parte de la reducción de estos efectos está relacionada con la reducción de la vulnerabilidad y es una tarea que el Estado debe dirigir a través de políticas públicas apropiadas.

2.2. Estrategias actuales

Como lo indicado en la sección anterior, Lima Metropolitana y Callao están expuestos al peligro de la ocurrencia de un sismo de gran magnitud en cualquier momento, pero el impacto que tenga este en la población dependerá del grado de vulnerabilidad de la misma. Para disminuir esta vulnerabilidad, se han creado planes a nivel nacional de cómo actuar antes durante y después de la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, los cuales serán descritos en la presente sección.

2.2.1 Plan de Operaciones de Emergencia (POE)

En el contexto descrito en la sección 2.1, la Municipalidad de Lima Metropolitana, el Gobierno Regional del Callao y el INDECI, con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Departamento de Ayuda Humanitaria de la Comisión Europea, desarrollaron durante el año 2010 y principios del 2011 el proyecto “Preparación de Desastre Sísmico o Tsunami y Recuperación Temprana en Lima y Callao”. Uno de los fines de dicho proyecto fue la construcción integrada del Plan de Operaciones de Emergencia de Lima Metropolitana y Región Callao, el cual será descrito en la presente sección.

El objetivo del POE es de “orientar las acciones de respuesta, en caso de emergencia o desastre, del gobierno regional y provincial y de las diferentes instituciones que son parte del Sistema Nacional de Defensa Civil en estos niveles, favoreciendo la preservación de la vida, la mitigación y la reducción de los efectos sobre los bienes, la economía y el ambiente en el territorio” (INDECI, 2011). Es por esto que va dirigido a las autoridades que conforman el SINADECI en sus jurisdicciones territoriales. Cada nivel territorial y sectorial debe ejecutar una serie de actividades específicas, agrupadas en procesos para tener una buena gestión de riesgos ante un desastre, estos son:

- **Estimación de riesgo**
Son las acciones que se realizan para tener el conocimiento de las amenazas, analizar la vulnerabilidad y establecer niveles de riesgo. Solo así se podrán tomar decisiones en la gestión de riesgos de desastres.
- **Prevención y reducción del riesgo**
Serie de acciones orientadas a evitar la existencia de nuevos riesgos en la sociedad y a reducir la vulnerabilidad y riesgos presentes en la gestión del desarrollo sostenible.
- **Preparación, respuesta y rehabilitación**
Acciones realizadas con el fin de brindar una óptima respuesta a la sociedad tras un desastre, garantizando una adecuada y pronta atención a la población afectada. Además de esto, rehabilitar los servicios básicos indispensables para, de este modo, regularizar las actividades en la zona afectada por el desastre.
- **Reconstrucción**
Serie de acciones realizadas para establecer condiciones sostenibles de desarrollo en la zona afectada. Deben asegurar la recuperación física, económica y social de las comunidades en cuestión.

Las operaciones de emergencia comprenden las acciones del tercer grupo de procesos mencionados para responder de la mejor manera posible ante un desastre. Este conjunto de acciones pueden ser agrupados en etapas o fases detalladas a continuación (INDECI, 2011):

- Preparación

Involucra actividades que se realizan antes de haber ocurrido el desastre, con el fin de tener mejores capacidades y esperar una óptima respuesta para cuando suceda. Sus principales elementos son los mostrados en el gráfico 2.4.

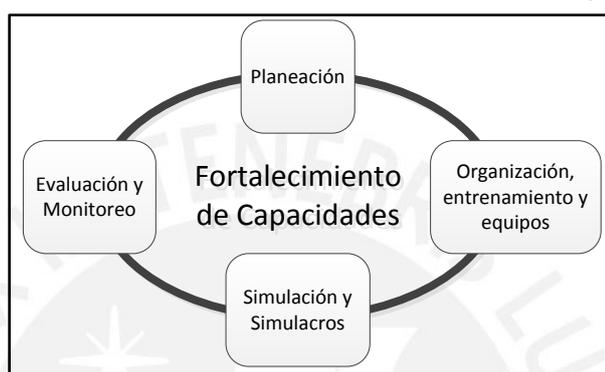


Gráfico 2.4. Preparación de emergencias

Fuente: INDECI (2011)

El planeamiento encierra el desarrollo de planes, procedimientos y protocolos necesarios para el POE. Estos planes deben de ser realistas y aplicables a todo tipo de emergencia o desastre. Todas las entidades que participan en esta gestión deben desarrollar procedimientos y protocolos, los cuales deben detallar las acciones específicas para implementar un plan.

La organización implica el desarrollo de modelos organizacionales, definición de funciones según niveles territoriales, inventario de todo tipo de recurso, capacitaciones, entrenamientos, sistemas de comunicación, entre otros. Para poder probar que todo se haya realizado correctamente se realizan ejercicios de simulación y simulacros para cada una de las funciones, de esta manera también se podrán evaluar y mejorar los planes establecidos. Finalmente, la evaluación y monitoreo indica que los planes deben ser actualizados de manera periódica y mejorados según los simulacros, además de garantizar la actualización de la información sobre los escenarios de riesgos (INDECI, 2011).

- Respuesta

Engloba las actividades ejecutadas ante la ocurrencia de un desastre utilizando recursos y aplicando procedimientos establecidos para salvar vidas y salvaguardar el bienestar social. En el gráfico 2.5 se muestran las acciones clave que se presentan en este proceso.

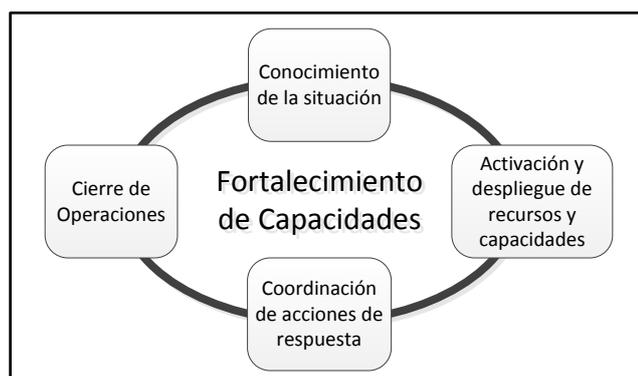


Gráfico 2.5. Respuesta a emergencias

Fuente: INDECI (2011)

El conocimiento de la situación comprende la recepción de información inicial sobre un posible desastre de importante magnitud y la confirmación de la ocurrencia de este, indicando sus características, severidad, localización y cantidad de la población afectada. Seguido de esto se procede a la activación y convocatoria de miembros del Comité de Defensa Civil y de los responsables de la coordinación de las áreas funcionales según el nivel territorial. Se definirán prioridades para el manejo del desastre, la capacidad de respuesta y autonomía en función de los recursos, según esto se evalúa la necesidad de solicitar apoyo a nivel de Gobierno.

La coordinación de acciones de respuesta son aquellas previstas en los planes de emergencia, contingencia y protocolos. Se debe verificar la realización de las acciones de respuesta, así como el cumplimiento de requerimientos de información por parte de los niveles superiores. Finalmente, cuando la situación ya ha sido controlada, se retorna al estado inicial para permitir el inicio de las tareas de rehabilitación (INDECI, 2011).

- **Rehabilitación**

Corresponde a normalización de las actividades en las zonas afectadas por el desastre para el restablecimiento de las condiciones iniciales. Inicia con la evaluación de daños y necesidades, el restablecimiento de los servicios básicos, provisión de vivienda temporal dependiendo del caso, y el tratamiento de las personas afectadas. Luego se empieza otro grupo de procesos relacionados con la reconstrucción (INDECI, 2011).

2.2.2 Estructura funcional para la atención de emergencias

En esta sección se presenta la estructura funcional para la atención de emergencias basado en el Sistema de Comando de Incidentes desarrollado en Estados Unidos, utilizando ampliamente a nivel internacional. Es una organización modular, incorporando todos los elementos necesarios de personal, instalaciones, equipo,

magnitud del desastre, con la participación de diferentes niveles del gobierno, sector privado y organizaciones no gubernamentales. El POE está dirigido a las autoridades que conforman el SINADECI en sus respectivas jurisdicciones territoriales y según sus capacidades, para las acciones del proceso de preparación, respuesta y rehabilitación en caso de emergencia o desastre. El gráfico 2.6 ilustra la estructura adaptada del Sistema de Comando de Incidentes.

Específicamente para el POE, se han definido una serie de tareas, agrupadas en seis áreas funcionales, las cuales son detalladas en la tabla 2.3, dividido a su vez en tres grandes grupos: Sección de Operaciones, las cuatro primeras; Sección de Comando, la quinta; y Sección de Logística, la última (INDECI, 2011).

- Sección de Operaciones

El coordinador de la sección de operaciones debe dirigir las cuatro áreas funcionales de carácter operativo: Rescate y Seguridad; Salud; Asistencia Humanitaria; y Servicios Generales y Medio Ambiente. Asimismo, debe reportar directamente al coordinador de la emergencia y responder ante cualquier solicitud que este tenga sobre la información relacionada a la sección de operaciones (INDECI, 2011).

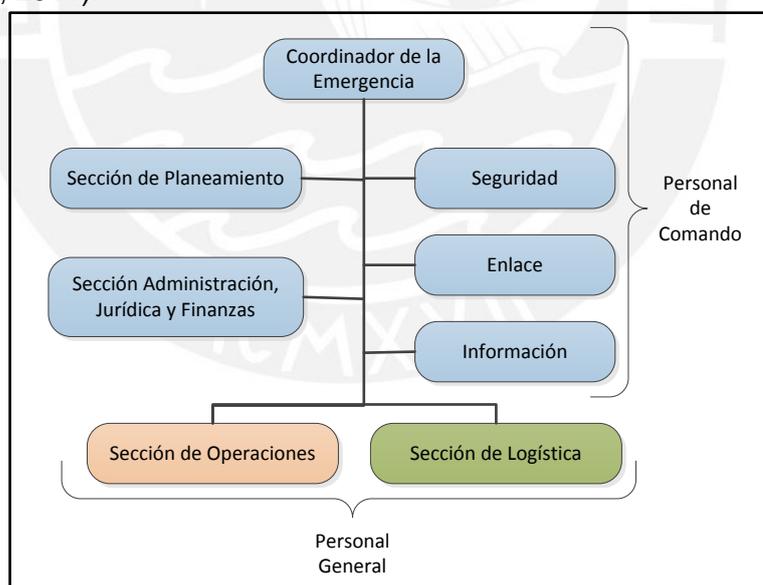


Gráfico 2.6. Estructura adaptada del Sistema Comando Incidente
Fuente: INDECI (2011)

La primera de las cuatro ramas, Rescate y Seguridad, se encargan principalmente de gestionar las acciones inmediatas realizadas para salvaguardar vidas, controlar eventos secundarios como incendios, explosiones y fugas; así como proteger los bienes y mantener la salud pública. Dichas actividades son efectuadas por la población organizada y por toda aquella entidad competente de primera

respuesta. La segunda rama, Salud, garantiza la atención médica oportuna ante la situación de emergencia mediante un sistema organizado y articulado. Además de esto asume la vigilancia del brote de alguna epidemia y el manejo de cadáveres a causa del desastre (INDECI, 2011).

La tercera rama, Asistencia Humanitaria, tiene como objetivo gestionar acciones relacionadas con la atención social hacia las personas afectadas por el desastre. Dentro de las actividades se encuentran las de empadronamiento, brindar un techo temporal, asistencia alimentaria y de agua, así como asistencia no alimentaria, entre otros. Finalmente, la cuarta rama; Servicios Generales, Hábitat y Medio Ambiente; se encarga de evaluar los daños en los servicios vitales, saneamiento básico, energía, telecomunicaciones, transporte, edificaciones y medio ambiente, para definir las medidas a tomar por las autoridades para la protección de la vida y la rápida recuperación de lo afectado (INDECI, 2011).

Tabla 2.3. Áreas de funciones de respuesta y tareas

Áreas funcionales	Tareas
Rescate y Seguridad	1.1 Búsqueda y rescate. 1.2 Medidas de seguridad y de tránsito. 1.3 Control de incendios. 1.4 Evacuación masiva de zonas afectadas y en riesgo. 1.5 Emergencias de materiales peligrosos.
Salud	2.1 Atención prehospitalaria. 2.2 Atención hospitalaria. 2.3 Vigilancia epidemiológica postdesastre. 2.4 Salud ambiental. 2.5 Manejo de cadáveres. 2.6 Salud mental.
Asistencia Humanitaria	3.1 Empadronamiento. 3.2 Techo de emergencia en lote. 3.3 Instalación y manejo de albergues. 3.4 Asistencia alimentaria. 3.5 Asistencia no alimentaria. 3.6 Dotación de agua temporal. 3.7 Protección de grupos vulnerables. 3.8 Reunificación familiar.
Servicios Generales, Hábitat y Medio Ambiente	4.1 Monitoreo de eventos naturales y/o inducidos, y riesgos concatenados. 4.2 Evaluación de daños y restablecimiento de servicios de transporte y comunicaciones. 4.3 Evaluación de daños y restablecimiento de servicios de agua y saneamiento. 4.4 Evaluación de daños y restablecimiento de servicios de energía. 4.5 Evaluación de daños en edificaciones públicas y privadas. 4.6 Estabilización y/o demolición de estructuras, remoción y manejo de escombros. 4.7 Evaluación de daños y restablecimiento de servicios de educación.
Dirección y Manejo de la emergencia	5.1 Planificación integral y coordinación de la emergencia. 5.2 Información pública. 5.3 Asuntos legales y administrativos. 5.4 Coordinación de la evaluación de daños y análisis de necesidades – EDAN. 5.5 Gestión de información y comunicaciones del COE. 5.6 Coordinación de la cooperación internacional. 5.7 Coordinación con otras regiones y el sector privado. 5.8 Planificación de la recuperación económica y social.
Logística y Recursos para las Operaciones y Toma de Decisiones	6.1 Inventario de recursos y análisis de necesidades logísticas. 6.2 Administración de almacenes. 6.3 Manejo de donaciones. 6.4 Manejo de recursos (personal, equipos, instalaciones, materiales). 6.5 Coordinación y manejo de medios de transporte (movilidad). 6.6 Manejo de la seguridad ocupacional y servicios a los respondientes (salud alimentos y otros).

Fuente: INDECI (2011)
Elaboración propia

- Sección de Comando

El comandante del incidente es responsable de todas las actividades que surgen a partir de la emergencia. El apoyo consta de tres actividades básicas: seguridad, enlace e información pública. La primera de ellas, seguridad, consiste en velar por la protección de la ciudadanía y controlar el orden público, así como garantizar la seguridad y libre circulación para adelantar las operaciones de respuesta. El responsable de enlace, es quien entabla contacto con organismos externos para el manejo de la emergencia, ya sean internacionales, sector privado, o sector público. Finalmente, la actividad de información pública consiste en brindar información a medios de prensa u otras organizaciones sobre la situación de emergencia (INDECI, 2011).

De forma paralela cuenta con dos áreas principales, Planeamiento y Administración. La primera de ellas se encarga de compilar, evaluar y divulgar la información relacionada con el manejo de la emergencia y el estado de los recursos. Con esto se prepara las estrategias operacionales de control para atender la emergencia y la recuperación tanto económica como social de la población. La segunda área está compuesta por tres unidades: Unidad Jurídica, encargada de velar por el cumplimiento de la normativa adecuada, así como la elaboración de convenios y contratos; Unidad de Finanzas y Compras, la cual administra los recursos financieros y vela por el eficiente manejo de los mismos; y finalmente la unidad de tiempos, cuya responsabilidad es controlar las horas laboradas por el personal (INDECI, 2011).

- Sección de Logística

El coordinador de la sección de Logística tiene como responsabilidad mantener los inventarios de forma adecuada, y proveer los recursos necesarios para la atención y rehabilitación pasado el desastre (INDECI, 2011).

Con estas tareas organizadas por áreas funcionales resulta más eficiente lograr el objetivo común, que es velar por el bienestar de la población y brindar una respuesta de ayuda lo más pronto posible.

2.2.3 Proyecto Esfera

En 1997 empezó el Proyecto Esfera impulsado por un grupo de organizaciones no gubernamentales y el Movimiento Internacional de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja. El objetivo de dicho proyecto es mejorar la calidad de las acciones durante las respuestas en casos de desastre y rendir cuentas acerca de ellas. Parte del principio que la población afectada tiene derecho a vivir con dignidad, por lo tanto merece recibir asistencia, así como tomar medidas para aliviar el sufrimiento humano.

Para poder plasmar estas convicciones esenciales, el Proyecto Esfera redactó la Carta Humanitaria y elaboró un conjunto de normas mínimas para lograr salvar vidas. Estas normas mínimas describen condiciones que se deben lograr en cualquier respuesta humanitaria para que la población afectada pueda recuperar sus condiciones de vida estables con dignidad. Las normas mínimas se dividen en cuatro grandes grupos mencionados a continuación:

- Normas mínimas sobre abastecimiento de agua, saneamiento y promoción de la higiene.
- Normas mínimas sobre seguridad alimentaria y nutrición.
- Normas mínimas sobre alojamiento, asentamientos humanos y artículos no alimentarios.
- Normas mínimas sobre acción de salud.

En la presente tesis se hará mayor hincapié en el tercer gran grupo ya que es un factor determinante indispensable para la supervivencia en las fases iniciales de un desastre. Es importante disponer de medios apropiados para preparar, cocinar y consumir los alimentos; de prendas de vestir y ropa de cama; y otro tipo de utensilios que se denominan artículos no alimentarios.

Independientemente de la solución de alojamiento que les toque a vivir a las personas de la zona afectada; como regresar a vivienda original, alojarse con otras familias o instalarse en asentamientos comunitarios temporales; deben seguir satisfaciendo sus necesidades personales y domésticas. Las familias de acogida también pueden precisar este tipo de asistencia para hacer frente a la carga adicional por alojar a otras personas. Para estos artículos no alimentarios se tienen cinco normas, las cuales se detallan a continuación:

- Norma 1 sobre artículos no alimentarios: enseres domésticos de uso personal y general, y artículos para la instalación de viviendas.
- Norma 2 sobre artículos no alimentarios: prendas de vestir y ropa de cama.
- Norma 3 sobre artículos no alimentarios: utensilios y enseres de cocina.
- Norma 4 sobre artículos no alimentarios: hornos de cocina, combustible y alumbrado.
- Norma 5 sobre artículos no alimentarios: herramientas y accesorios

El detalle de cada norma se explica en Proyecto Esfera (2011).

Actualmente, Perú no forma parte de los países que se han suscrito a estas normas; sin embargo sí cuenta con almacenes de ayuda humanitaria y con bienes similares a los mencionados en el Proyecto Esfera. Estos bienes se encuentran detallados en el Plan Nacional de Operaciones de Emergencia resumidos en una tabla en el anexo 3. Teniendo en cuenta las normas del Proyecto Esfera, se podrá armar de una manera más eficiente los *kits* de artículos no alimentarios que se repartirían a la población y en lo posible de forma justa como lo sugiere el Proyecto Esfera. De este modo se podrá realizar en el siguiente capítulo un mejor modelo del plan de distribución de estos *kits*.

En la actualidad se cuentan con 174 almacenes, los cuales cuentan con bienes de ayuda humanitaria mencionados en el anexo 3. Estos almacenes están clasificados, según INDECI (2010), en tres grupos según un criterio de jerarquización:

“Almacenes nacionales: ubicados estratégicamente con la finalidad de dar una respuesta rápida ante la ocurrencia de emergencias o desastres que superen la capacidad de respuesta del Gobierno Regional y reabastecer a los almacenes regionales.

Almacenes regionales: ubicados generalmente en las capitales de los departamentos para dar una respuesta rápida ante la ocurrencia de una emergencia en su jurisdicción. Asimismo tiene como finalidad reabastecer los almacenes adelantados.

Almacenes adelantados: son espacios físicos alejados de los almacenes nacionales o regionales, o de difícil acceso y tienen como objetivo distribuir de manera eficiente los bienes de ayuda humanitaria en dichas localidades. Se encuentran bajo la custodia de las municipalidades provinciales o distritales.”

En la tabla 2.4 observamos que Lima tiene seis de estos almacenes mientras que Callao solo uno, los cuales serían los puntos de depósito o abastecimiento ante una emergencia o desastre en Lima Metropolitana y Callao. Otros departamentos tienen mayor número de almacenes dependiendo de la vulnerabilidad de la región. Por ejemplo en 2010 ocurrieron 262 emergencias en Lima afectando 350 viviendas mientras que en Piura ocurrieron 153 emergencias afectando 2 808 viviendas y dejando 100 veces más de heridos principalmente por lluvias y vientos fuertes (INDECI, 2010). Cabe resaltar que si se agotasen los almacenes que le competen abastecer a la zona damnificada, se procederá al traslado de ayuda humanitaria de almacenes de otras provincias.

Tabla 2.4. Número y ubicación de los almacenes de Defensa Civil

Región	Total Almacenes	Número de almacenes		
		Almacenes nacionales	Almacenes regionales	Almacenes adelantados
TOTAL	175	12	25	138
Amazonas	8	1	1	6
Ancash	5	0	1	4
Apurímac	6	0	1	5
Arequipa	9	1	1	7
Ayacucho	4	0	1	3
Cajamarca	10	0	1	9
Callao	1	0	1	0
Cusco	7	1	1	5
Huancavelica	5	0	1	4
Huánuco	9	0	1	8
Ica	5	1	1	3
Junín	5	1	1	3
La Libertad	8	1	1	6
Lambayeque	7	0	1	6
Lima	6	1	1	4
Loreto	12	1	1	10
Madre de Dios	4	0	1	3
Moquegua	6	0	1	5
Pasco	4	0	1	3
Piura	18	1	1	16
Puno	12	1	1	10
San Martín	4	1	1	2
Tacna	7	1	1	5
Tumbes	6	0	1	5
Ucayali	7	0	1	6

Fuente: INDECI (2010)
Elaboración propia

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO

3.1 Presentación del escenario crítico

En la presente sección se detallará el escenario crítico que podría afectar Lima Metropolitana y Callao. Según esto se definirá la cantidad de damnificados para cada distrito y será información de entrada para el modelo.

3.1.1 Estudios previos

Como se mencionó en el punto 2.1.1, CISMID/APESEG (2005) realizó un estudio de microzonificación sísmica para determinar el riesgo sísmico de los distritos de Lima Metropolitana y Callao. Con base en ese estudio, PREDES (2009) evaluó cómo impactaría un sismo de gran magnitud al espacio geográfico descrito en el estudio. Se concluyó que 34 zonas urbanas se encuentran en muy alto riesgo; 29 en alto riesgo; 20 en mediano riesgo y 23 zonas en bajo riesgo. Además, a causa del movimiento sísmico, colapsarían 200 347 viviendas y 348 329 resultarían altamente afectadas.

Con estos resultados, Serpa (2014) evaluó la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria a la población damnificada para determinar si el número de almacenes y su ubicación eran los adecuados. En primer lugar calculó la población afectada que necesitaría de estos recursos, multiplicando la cantidad de viviendas que quedarían inhabitables con el promedio de personas por vivienda en cada distrito. Para determinar la ubicación de los almacenes se empezará descartando los distritos con alto riesgo sísmico o que estén muy cercanos al litoral por el riesgo de tsunamis. Para la realización del modelo de optimización, se elaboró una red donde cada nodo era un distrito y los arcos eran las distancias entre ellos.

El modelo de Serpa (2014) evaluó varios escenarios en los cuales variaba el número total de almacenes. Esto se hizo para determinar si el ahorro en kilómetros recorridos justificaba los costos por mayor número de almacenes. En la tabla 3.1 se muestran los resultados de los distintos escenarios evaluados. La autora tomó como indicador la distancia en kilómetros que tendría que transportarse la ayuda humanitaria para atender a todos los damnificados desde cada almacén, así como el número de damnificados atendidos. Si bien el objetivo fue minimizar la distancia recorrida, es implícito el criterio económico que subyace en ese objetivo, ya que la distancia genera costos de combustible, cantidad de vehículos, entre otros. Así, Serpa incluye de manera implícita un criterio económico a través de la minimización de la distancia

recorrida en el reparto de la ayuda humanitaria y un criterio social a través del número de damnificados atendidos.

Tabla 3.1. Resultados por número de almacenes

Cantidad de almacenes	Kilómetros recorridos
20	669.2
22	641.7
27	582.3
32	546.1
37	538.3

Fuente: Serpa (2014)
Elaboración propia

El escenario escogido, el cual también respetaba el presupuesto que disponía en 2013 el INDECI de 110 millones de nuevos soles, es el de 22 almacenes teniendo un recorrido total de 642 km. En el gráfico 3.1 se muestra la ubicación de los 22 depósitos que abastecerían a la población damnificada de Lima Metropolitana y Callao. Para determinar estas ubicaciones, se tuvo en cuenta la calidad del suelo de los distritos, pues ciertas zonas tienden a sufrir mayor daño ante un movimiento telúrico, según se indicó en el anexo 2. Este escenario además cumple con un criterio social, pues lograría atender casi en su totalidad a la demanda de damnificados, bajo los supuestos definidos para el modelo.

La tabla 3.2 muestra un resumen de los resultados del modelo propuesto, comparados con la situación actual. Podemos observar que con el modelo propuesto por Serpa (2014) se logra atender a más de trece veces el número de damnificados comparado con la situación actual, y recorriendo una distancia total que representa menos del 5% de lo que recorrería en el escenario de la situación actual.

Tabla 3.2. Comparación de resultados

	Situación actual	Modelo propuesto
Capacidad de respuesta (personas atendidas)	135 152	1 795 735
Distancia total recorrida (km)	19 762	642
Dinero ahorrado (millones de soles)		2 242

Fuente: Serpa (2014)
Elaboración propia

Cuando se mencionan damnificados atendidos en la capacidad de respuesta, se refiere a que estas personas recibieron el *kit* completo de ayuda humanitaria no alimentaria. Estos *kits* contienen los elementos detallados en la tabla 3.3, en donde se observa que el volumen necesario por persona es aproximadamente 0.07 metros

cúbicos, es decir, si el hogar tuviese seis integrantes, el *kit* por hogar sería de 0.418 metros cúbicos.

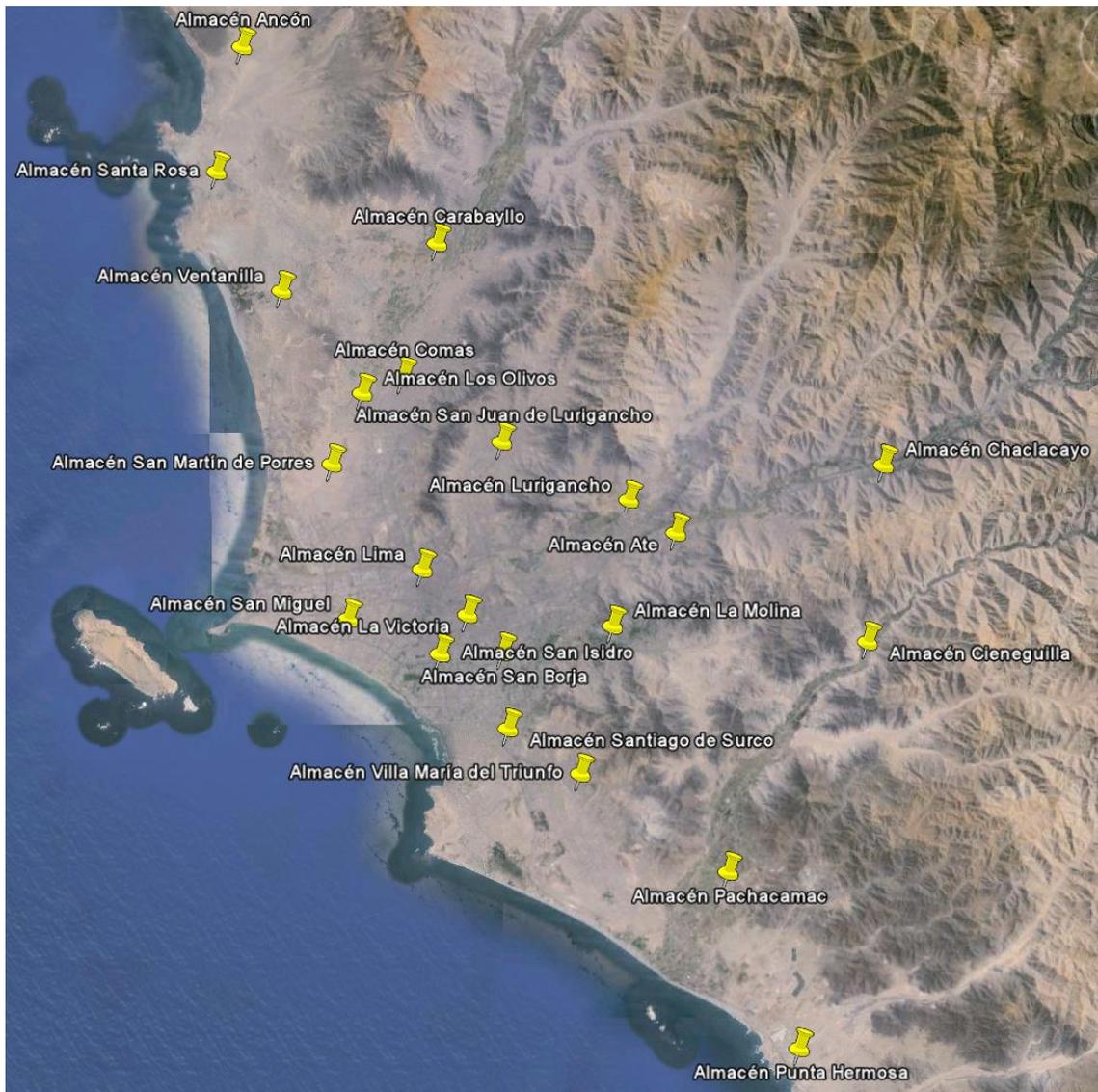


Gráfico 3.1. Mapa de almacenes en Lima Metropolitana y Callao

Fuente: Serpa (2014)

Elaboración propia

Cabe resaltar que algunos de estos bienes son de distribución individual, como es el caso de la frazada, colcha, muda de ropa y el *kit* de higiene; mientras que otros son para distribución por comunidades, como es el caso de la carpa, bidón y la caja de utensilios de cocina y enseres.

Tabla 3.3. Volumen necesario por *kit*

Ítem	Volumen unitario (m ³)	Volumen hogar (m ³)
Frazada (comprimida)	0.006	0.039
Colcha de 1.5 plazas	0.003	0.019
Muda de ropa	0.006	0.034
Bidón de plástico con tapa	0.003	0.020
Caja de utensilios de cocina y enseres	0.019	0.113
<i>Kit</i> de higiene	0.002	0.012
Carpa familiar para seis personas	0.030	0.180
Total	0.070	0.417

Fuente: Serpa (2014)
Elaboración propia

3.1.2 Descripción del escenario

Para determinar el escenario crítico se ha tomado como referencia el estudio hecho por PREDES (2009) el cual indica la magnitud máxima del probable sismo, así como el estudio de microzonificación realizado por CISMID, el cual indica el grado de vulnerabilidad y riesgo sísmico de Lima Metropolitana y Callao.

Según el estudio de PREDES (2009), el evento sísmico de gran magnitud que podría ocurrir en Lima Metropolitana y Callao tiene las siguientes características:

- Magnitud: 8,0 Mw
- Intensidades máximas: VIII escala Mercalli Modificada, entre Lima Metropolitana y Chimbote.
- Aceleraciones máximas promedio: 350 – 400 Gals (cm/s²)
- Epicentro: frente a Lima.
- Hipocentro profundidad: 33 km.
- Extensión afectada: para este estudio se presupone efectos destructivos restringidos solo a Lima Metropolitana y la Provincia Constitucional del Callao. Sin embargo, un evento real afectaría a los departamentos de Lima, Ancash, Ica, Huánuco, Junín, Pasco y Huancavelica.

Un movimiento telúrico de tal magnitud desencadenaría un posible tsunami, el cual tendría las siguientes características:

- Altura: tren de olas de unos 6 metros de altura que alcanzarán la línea costera poco después de ocurrido el terremoto.
- Dirección de las olas: oeste-este u oeste-sureste.

- Velocidad de desplazamiento aproximada: 400 km/h.
- Ancho de las olas: hasta 200 km.
- Altura de las olas: 6 metros.
- Tiempo experimental promedio de llegada a la costa: 18 minutos.
- Tiempo medido de llegada a La Punta: 11 minutos.
- Zona de inundación: variable, de acuerdo con la cota del terreno, con rangos de impacto por la altura de la máxima inundación prevista.
- Extensión afectada: el litoral de Lima Metropolitana, el puerto y la franja costera de la Provincia Constitucional del Callao.

En este escenario crítico se realizarán todos los cálculos posteriores para determinar algunos parámetros del modelo de programación lineal entera mixta.

3.1.3 Población damnificada

La estimación de la vulnerabilidad de las viviendas en Lima Metropolitana y Callao depende de múltiples factores, de los cuales se destaca principalmente el tipo de suelo. Según esto se determina la ampliación sísmica y esto se combina con las características propias de la infraestructura, tales como material de construcción, tipología de vivienda o la altura de la misma. Simulando el escenario crítico descrito en la sección previa, bajo estos parámetros de vulnerabilidad, SINADECI (2009) determinó la cantidad de viviendas que serían consideradas inhabitables en Lima Metropolitana y Callao, cuyas cifras se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resumen daño viviendas

VIVIENDAS	
Destruídas	200 347
Inhabitables	348 328
No afectada	1 331 583
TOTAL	1 880 258

Fuente: SINADECI (2009)
Elaboración propia

Un dato importante para el modelo es la demanda que deberá satisfacer cada almacén, es decir la cantidad de *kits* que deberán repartir en cada clúster a la población damnificada. Para este cálculo, Serpa (2014) trabajó con datos del censo nacional elaborado por el INEI en el año 2007. Luego, multiplicó el promedio de personas por hogar al promedio de hogares por vivienda, y obtuvo el promedio de personas por vivienda en cada distrito. Cabe resaltar que “un hogar” se considera a la familia, mientras que vivienda hace referencia a la construcción donde habitan estos hogares. Este valor obtenido se multiplica por el número de viviendas

inhabitables, según el reporte de PREDES (2009), para hallar el total de personas afectadas por distrito. Con esto último se puede calcular el porcentaje de personas afectadas por distrito al compararlos con la población total también del distrito.

$$\text{Promedio de personas por vivienda en el distrito } i = \text{Promedio de hogares por vivienda en el distrito } i \times \text{Promedio de personas por hogar en el distrito } i$$

$$\text{Total de personas afectadas en el distrito } i = \text{Promedio de personas por vivienda en el distrito } i \times \text{Número de viviendas inhabitables en el distrito } i$$

$$\text{Porcentaje de afectados en el distrito } i = \frac{\text{Total de personas afectadas en el distrito } i}{\text{Población total en el distrito } i \text{ (2007)}} \times 100\%$$

Posterior a esto, se multiplica el porcentaje de afectados en el distrito *i* por la población proyectada al 2012 según INEI (2009). Para que sea un resultado más real, se toma en cuenta el porcentaje de fallecidos ante un evento de esta magnitud y se le resta al total de afectados. De esta manera se retiran del cálculo aproximadamente el 0.61% de damnificados por fallecimiento, según el reporte de PREDES (2009).

$$\text{Población afectada en el distrito } i = \text{Población 2012 en el distrito } i \times \text{Porcentaje de afectados en el distrito } i$$

$$\text{Población afectada corregida en el distrito } i = \text{Población afectada en el distrito } i \times (1 - \text{Porcentaje de fallecidos en el distrito } i)$$

En la tabla 3.5 se muestra la estimación de la cantidad de personas damnificadas en cada distrito si es que ocurriese el desastre descrito. A cada una de estas personas le correspondería un *kit* de ayuda humanitaria no alimentaria con los ítems mencionados en la tabla 3.3, con lo que se obtiene también el número de *kits* necesarios por cada almacén. En la tabla 3.5 se aprecia que en Lima Metropolitana y Callao habrá una demanda de casi 1.8 millones de *kits* de ayuda humanitaria no alimentaria, asimismo, en el gráfico 3.2 se ilustra la distribución de damnificados por distrito. Con base en esta data se obtiene la cantidad demandada para cada clúster según la agrupación definida en el anexo 4. Por ejemplo el almacén de San Borja incluirá la demanda de los distritos San Borja y San Luis, cuyo total es 3 831 damnificados. Mientras que el almacén de Carabayllo, que se encarga de repartir a

todo ese distrito y parte de Comas y Puente Piedra, obteniendo casi 300 000 damnificados.

Tabla 3.5. Población damnificada por distrito

Distrito	Población damnificada	Distrito	Población damnificada
San Juan de Lurigancho	314 549	San Miguel	3 185
Comas	242 235	Breña	3 031
Callao	195 954	Bellavista	2 810
Puente Piedra	144 323	San Borja	2 729
Villa María del Triunfo	133 171	Pucusana	2 686
San Juan de Miraflores	128 435	La Perla	2 348
Carabayllo	127 612	Surquillo	2 240
Villa El Salvador	113 993	Miraflores	1 902
Lurigancho	74 186	Pueblo Libre	1 877
Ate	69 954	Jesús María	1 672
Chorrillos	51 918	San Isidro	1 374
Lurín	36 312	Lince	1 272
Lima	18 674	Magdalena del Mar	1 204
Santa Anita	15 339	San Luis	1 102
Pachacámac	15 260	San Bartolo	1 049
Ventanilla	14 435	Santa Rosa	850
Santiago de Surco	9 512	Chaclacayo	815
Los Olivos	9 316	Ancón	751
El Agustino	8 913	Carmen de la Legua	400
Barranco	7 969	Cieneguilla	258
La Molina	6 971	Punta Hermosa	219
San Martín de Porres	6 736	Punta Negra	157
La Victoria	6 537	La Punta	145
Independencia	4 865	Santa María del Mar	74
Rímac	4 416	TOTAL	1,795,735

Fuente: Serpa (2014)
Elaboración propia

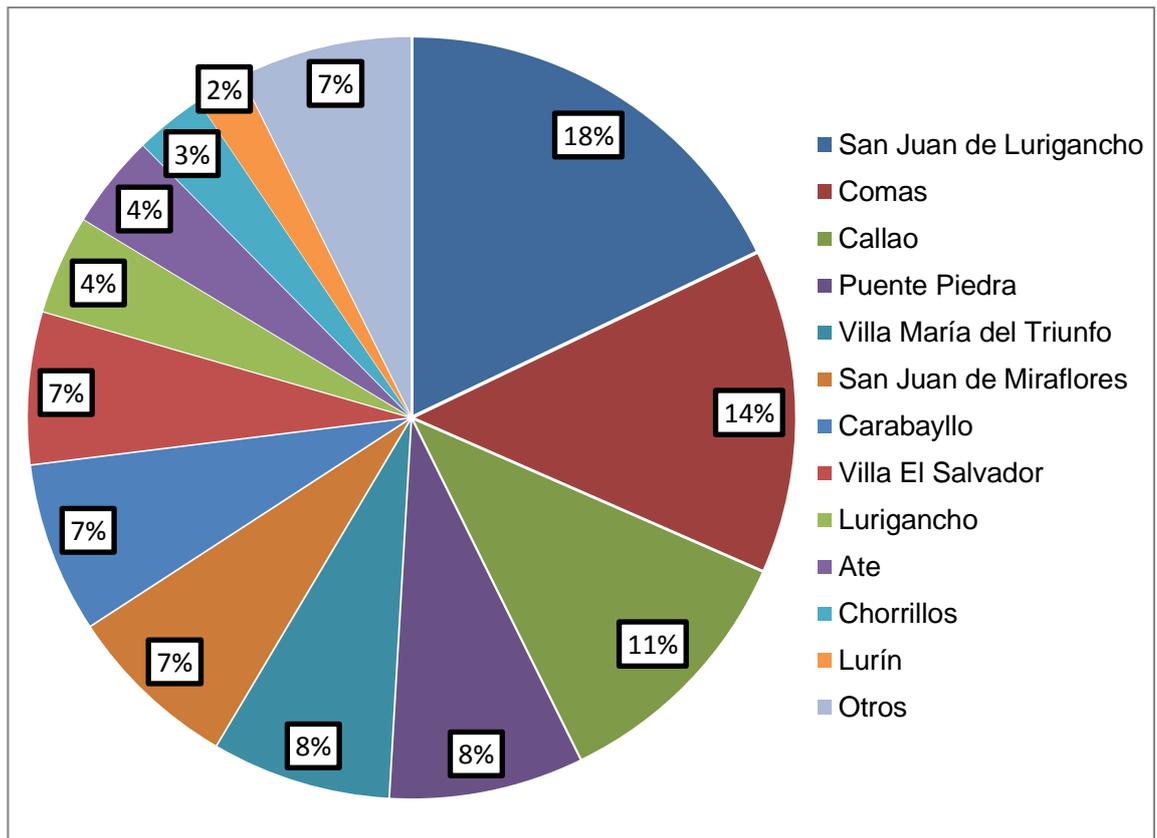


Gráfico 3.2. Distribución de damnificados por distritos
Elaboración propia

3.2 Modelo de VRP con ventanas de tiempo (VRPTW)

En esta sección se justificará el uso de un modelo VRP con ventanas de tiempo para solucionar el problema de distribución de ayuda humanitaria no alimentaria tras un sismo de gran magnitud. Además se explicará a detalle cada componente de dicho modelo.

3.2.1 Justificación del modelo

Como se indicó en el capítulo 2, el protocolo del POE indica que antes de realizar la distribución de la asistencia humanitaria no alimentaria, se debe realizar un empadronamiento para poder determinar el tamaño de la población damnificada. Una vez obtenida la cantidad demandada de artículos, y a qué zonas pertenecen, se procederá con la repartición de estos bienes. Por otro lado, no se cuenta con un plan de ruteo de vehículos apoyado en un enfoque científico.

Dado que todos los *kits* están en un almacén y se busca repartirlos a toda la población damnificada, representada por nodos, podría usarse el modelo de *Travel Salesman Problem*. Sin embargo, calcular una única ruta para satisfacer a la totalidad de la demanda es irreal pues no se cuenta con un vehículo que pueda transportar tanto

volumen a la vez. Por esta razón, un mejor modelo sería el VRP, explicado en el capítulo 1, porque se determinarán rutas utilizando tantos vehículos como sean necesarios tal que no excedan su capacidad máxima de carga.

Según INDECI (2010), estos bienes deben de ser distribuidos de manera gratuita e inmediata a la población damnificada durante las primeras 72 horas de ocurrido un desastre. El modelo de VRP garantiza que se obtendrán las rutas más cortas porque tiene como objetivo minimizar la distancia total recorrida; sin embargo, no considera hacerlo respetando un horario determinado. Por este motivo, se empleará el modelo de VRP con ventanas de tiempo, para respetar esta norma de las 72 horas indicada por el INDECI.

3.2.2 Explicación de los componentes del modelo

En el capítulo 1 se explicó de manera general el modelo VRPTW; sin embargo, en la presente sección se explicará de manera más minuciosa cada componente del modelo. A continuación se presenta las variables de decisión, la función objetivo y cada restricción del modelo y se explicará la lógica de cada uno de ellos.

Conjuntos e índices

- K Conjunto de vehículos que realizarán el servicio
- A Conjunto de arcos en la red
- V Conjunto de nodos en la red
- N Conjunto de nodos en la red, excepto el depósito
- $\Delta^+(i)$ Conjunto de posibles nodos alcanzables desde el nodo i
- $\Delta^-(i)$ Conjunto de posibles nodos desde los cuales se puede llegar al nodo i
- i Nodo de origen en la red
- j Nodo de destino en la red
- k Vehículo perteneciente a la flota

Parámetros

- C_{ij} Costo para trasladarse del nodo i al nodo j
- d_i Demanda del nodo i
- C Capacidad de cada vehículo
- a_i Instante de tiempo en el que puede empezar el servicio en el nodo i
- b_i Instante de tiempo máximo para empezar el servicio en el nodo i
- s_i Duración del servicio en el nodo i
- t_{ij} Tiempo que demora ir del nodo i al nodo j

Variables de decisión

- X_{ijk} Elección de ir o no del nodo i al nodo j con el vehículo k
- W_{ik} Instante de tiempo en el que el vehículo k inicia el servicio en el nodo i

Función objetivo

$$\text{Mín} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Esta primera sentencia es la función objetivo que minimiza el costo total de la red. Como se ilustra en el gráfico 3.3, se evalúa cada arco posible para cada vehículo y, si dicho medio de transporte “ k ” usa el arco “ ij ”, es decir si $x_{ijk}=1$, entonces se toma el costo c_{ij} del arco y este se incluye en la sumatoria. Caso contrario, si $x_{ijk}=0$, entonces el costo del arco se multiplica por cero, por lo que dicho costo no se considera en el costo acumulado.

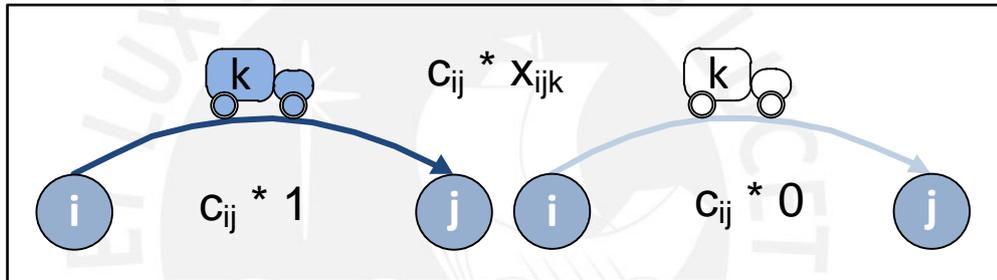


Gráfico 3.3. Ejemplo acumulación de costos
Elaboración propia

Restricciones

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

La restricción (2) indica que desde cada cliente “ i ”, solo puede salir un vehículo y elegir solo un camino “ ij ” hacia un “ j ” perteneciente al conjunto de posibles clientes alcanzables desde “ i ” como se ilustra en el gráfico 3.4. El hecho de que un vehículo parta de cada cliente garantiza que todos estos sean atendidos y por ende, que su demanda sea satisfecha, si es que el modelo tiene solución factible. Esta restricción no impide que dos clientes distintos elijan el mismo destino “ j ”.

$$\sum_{j \in \Delta^+(0)} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

La restricción (3) garantiza que cada vehículo “ k ” solo pueda, y tenga que, dirigirse a un posiblemente alcanzable cliente “ j ”, partiendo desde el depósito “ D ” tal y como se muestra en el gráfico 3.5. De esta manera se evita que haya vehículos que realicen

doble ruta. Sin embargo, no garantiza que dos vehículos se dirijan al mismo cliente “j” partiendo del depósito.

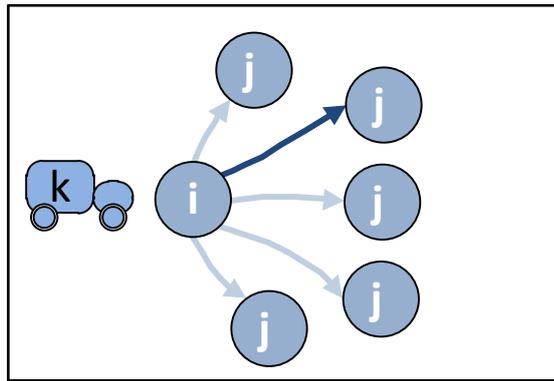


Gráfico 3.4. Elección de un solo camino
Elaboración propia

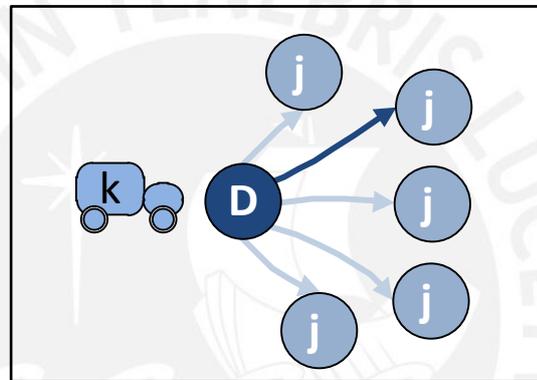


Gráfico 3.5. Una sola ruta por vehículo
Elaboración propia

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{ijk} - \sum_{i \in \Delta^+(j)} x_{jik} = 0 \quad \forall j \in N; k \in K \quad (4)$$

La cantidad de caminos tomados por un vehículo “k” para llegar a un cliente “j” es la misma que los caminos tomados para salir de dicho nodo. El gráfico 3.6 muestra un ejemplo en el que hacia un nodo “j”, se toma solo un camino, y para salir de dicho nodo, también se elige en total un solo camino. Esta restricción complementa las dos restricciones anteriores. En el caso de la restricción (2), esta sentencia impide que dos vehículos distintos elijan el mismo destino “j”, pues ambos tendrían que salir de este cliente y esto va en contra de la restricción (2). En el caso de la restricción (3) ocurre algo similar pues de darse el caso que dos vehículos se dirijan a un mismo cliente “j” partiendo desde el depósito, dos vehículos tendrían que salir de este cliente, lo cual va en contra de la restricción (2).

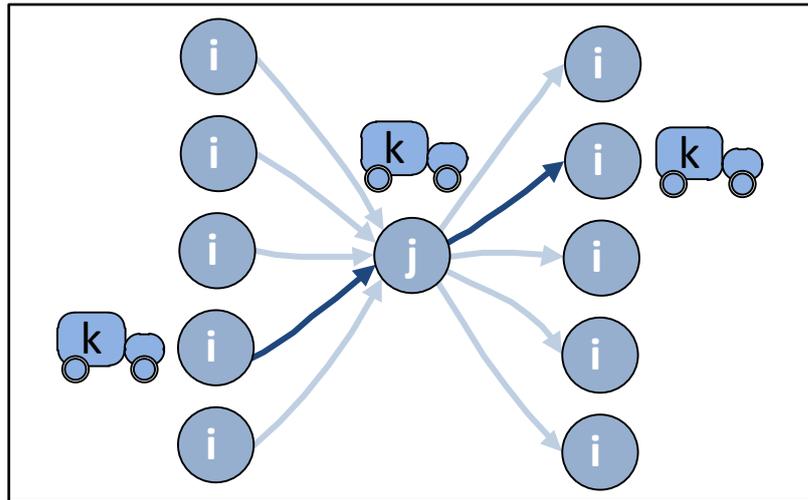


Gráfico 3.6. Igual número de vehículos que entran y salen de un nodo
Elaboración propia

$$\sum_{i \in \Delta^-(n+1)} x_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

La restricción (5) indica que para cada circuito realizado por el vehículo “k”, exista solo un cliente que lo conecte de regreso con el depósito. De este modo se evita que queden vehículos varados en la ciudad que no permitan finalizar los circuitos. En el gráfico 3.7 se muestra un ejemplo en el cual el último cliente del recorrido es un cliente “i” y es la única conexión que tiene el vehículo con el depósito. Esta sentencia por sí misma no descarta la posibilidad que dos circuitos visiten el mismo cliente “i” antes de llegar al depósito. Sin embargo, por la restricción (4), si ocurriese tal caso, dos vehículos deberían de salir de dicho cliente “i”, y violaría de la restricción (2). Es por esto que sí se puede afirmar que cada circuito visitará clientes distintos antes de retornar al depósito.

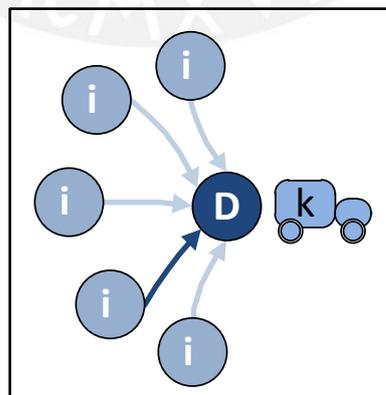


Gráfico 3.7. Cada vehículo debe regresar al depósito
Elaboración propia

$$x_{ijk}(w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk}) \leq 0 \quad \forall k \in K; (i,j) \in A \quad (6)$$

En la restricción (6), si el vehículo “k” va del cliente “i” al “j”, entonces no podrá iniciar el servicio en “j” hasta que el cliente “i” haya terminado de recibir el servicio y haya pasado el tiempo t_{ij} que toma realizar el recorrido “ij”. Si dicho vehículo “k” no toma la ruta “ij”, entonces no se toma en cuenta esta restricción. De este modo se evitan incoherencias en la secuencia y no se realicen servicios antes que el vehículo haya llegado a un cliente. En el gráfico 3.8 se muestra claramente cómo se deben respetar estas condiciones de tiempo. Antes que empiece el servicio en “j” hubo tiempo suficiente para terminar el servicio en “i” y para transportarse, incluso se genera una holgura de tiempo antes que esto suceda.

Cabe resaltar que en esta restricción está multiplicando las variables x_{ijk} y w_{ik} , por tanto, el modelo sería no lineal. Debido a que x_{ijk} es una variable de decisión que puede tomar solo los valores de 1 o 0, la restricción (6) se puede transformar a una forma lineal de la siguiente forma:

$$w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk} \leq (1 - x_{ijk})M_{ij} \quad \forall k \in K; (i, j) \in A \quad (6a)$$

Donde M_{ij} es una constante positiva lo suficientemente grande. De este modo, si $x_{ijk}=1$, la restricción quedaría:

$$w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk} \leq 0$$

$$w_{ik} + s_i + t_{ij} \leq w_{jk}$$

Es decir, en el nodo “j” empezará el servicio en el instante w_{jk} luego de que haya hecho el servicio en el tiempo s_i en el nodo i y luego de haberse trasladado hacia el nodo j en el tiempo t_{ij} .

Si $x_{ijk}=0$, entonces $w_{ik}+s_i+t_{ij}-w_{jk} \leq M_{ij}$, lo cual hace que w_{ik} , w_{jk} , y x_{ijk} tomen cualquier valor para satisfacer la restricción, en este caso dicha restricción es redundante.

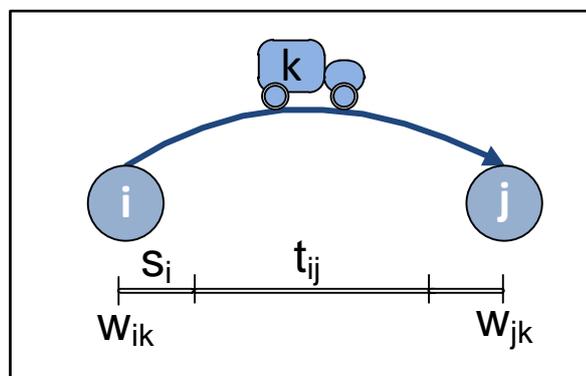


Gráfico 3.8. Lógica de la secuencia de actividades
Elaboración propia

$$a_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \leq w_{ik} \leq b_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \quad \forall i \in N; k \in K \quad (7)$$

La restricción (7) garantiza que el instante de tiempo en el que inicia el servicio en el cliente “i” por el vehículo “k” debe encontrarse en el intervalo dado por la ventana de tiempo de dicho cliente, tal y como se ilustra en el gráfico 3.9. Si dicho vehículo “k” no visita al cliente “i”, entonces no se considera esta restricción. Si un vehículo “k” llega al cliente “i” en un instante previo al límite inferior de la ventana de tiempo de dicho cliente, entonces el vehículo deberá esperar.

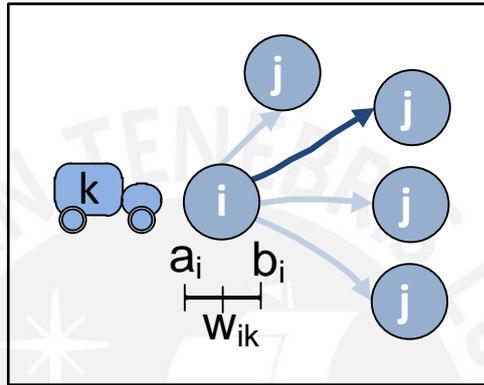


Gráfico 3.9. Respeto de las ventanas de tiempo
Elaboración propia

$$E \leq w_{ik} \leq L \quad \forall k \in K; i \in \{0, n + 1\} \quad (8)$$

De manera similar a la restricción (7), la restricción (8) indica que el instante de tiempo que empiece el servicio para cada cliente “i” por cada vehículo “k”, debe encontrarse dentro de la ventana de tiempo de atención del depósito. Es decir, el vehículo “k” debe tener una salida del depósito en un instante de tiempo que le permita atender a todos los clientes involucrados en su ruta, respetando así la ventana de tiempo del depósito.

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk} \leq C \quad \forall k \in K \quad (9)$$

La restricción (9) indica que la suma de las demandas de cada cliente “i” pertenecientes a un circuito correspondiente al vehículo “k”, no debe sobrepasar la capacidad máxima del mismo. Todos los clientes “i” visitados en un circuito tendrán un $x_{ijk}=1$, por lo que se multiplicarán estos a las demandas de dichos clientes y entrarán en la sumatoria. En el circuito mostrado en el gráfico 3.10, el vehículo asignado debe tener una capacidad mayor a la demandada, la cual es la suma de d_1 , d_2 , y d_3 .

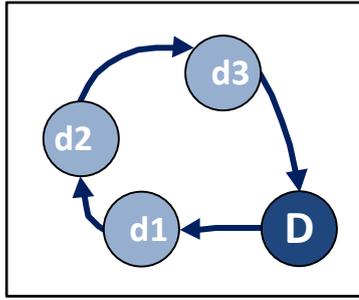


Gráfico 3.10. Demanda total de la ruta dentro de la capacidad del vehículo
Elaboración propia

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K; (i,j) \in A \quad (10)$$

Finalmente, la restricción (10) define al modelo lineal como entero binario ya que x_{ijk} es una variable de decisión. La otra variable del modelo, w_{ik} , no exige que sea entera pero sí que sea mayor o igual a cero, por tratarse de la representación de un instante de tiempo. No se utiliza una restricción para este caso ya que se especificó en la restricción (8) que esta variable debe ser mayor al instante de tiempo “E”, el cual es un parámetro mayor o igual a cero.

Con ayuda de este modelo se obtiene implícitamente el sentido que tomará cada circuito al tener los instantes de tiempo de inicio del servicio en cada cliente, cosa que no ocurre con el modelo básico de VRP. El gráfico 3.11 ilustra una solución gráfica de un VRPTW empleando el modelo propuesto, empleando dos vehículos, por lo que se obtienen dos circuitos.

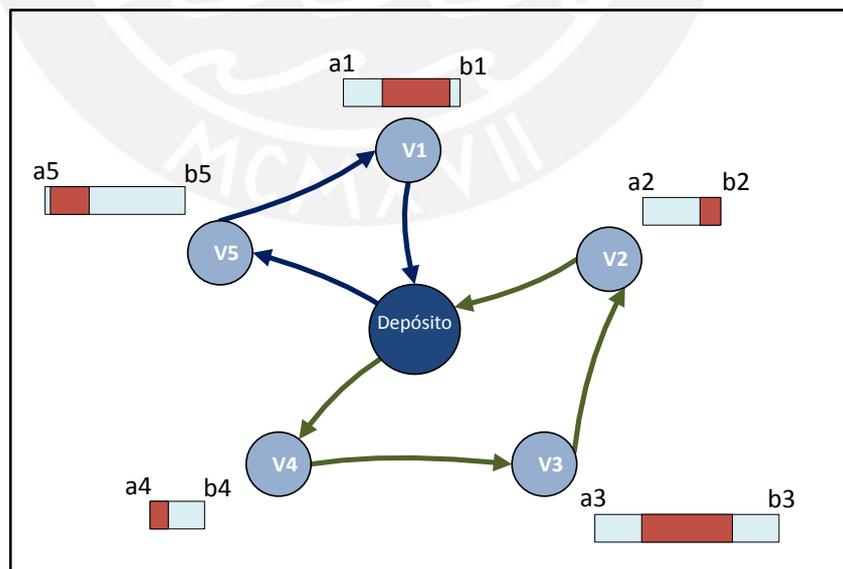


Gráfico 3.11. Ejemplo de solución gráfica de VRPTW
Elaboración propia

Un vehículo empezará su recorrido en el cliente 5, luego se dirige al cliente 1 y finalmente regresa al depósito; mientras que el otro vehículo visita a los clientes 4, 3 y 2 antes de regresar al depósito. Es importante que los circuitos se realicen en el sentido indicado pues de lo contrario no podrán cumplir con las ventanas de tiempo asociadas a cada cliente. La parte sombreada dentro de las ventanas de tiempo, indican el periodo en el cual se brindó el servicio a cada cliente y se comprueba que todas las demandas fueron satisfechas dentro del horario fijado. Es importante resaltar que todos los clientes fueron atendidos al ser esta una condición del VRPTW.

3.3 Consideraciones para el modelo

En esta sección se definirá cómo se adaptará el modelo de VRPTW al contexto de ayuda humanitaria de esta tesis. Además se presentará una estrategia de distribución de la ayuda humanitaria no alimentaria. Finalmente, se expondrán los supuestos a los que se sujeta el modelo propuesto.

3.3.1 Depósitos y clústeres

En el capítulo 2 se indicó cuántos almacenes de ayuda humanitaria existen en Perú y cómo están distribuidos por departamentos. En el estudio mencionado en el punto 3.1.1, se concluyó que cuatro almacenes adelantados en Lima Metropolitana y Callao no son suficientes para satisfacer la demanda de población damnificada ante el impacto de un sismo de gran magnitud en este espacio geográfico. Es por esto que se emplearán los 22 almacenes que es la cantidad óptima según estudio. Cada depósito tiene como objetivo abastecer de ayuda humanitaria a un espacio geográfico determinado, el cual se denominará clúster, y abarca uno o varios distritos como se muestra en el gráfico 3.12.

La relación de los distritos en los cuales tiene que haber un depósito y a qué distritos abastecen se encuentra detallada en el anexo 4. Por ejemplo, el almacén ubicado en San Isidro abastecerá al clúster conformado por los distritos de Jesús María, Lince, Magdalena del Mar, Miraflores, San Isidro y Surquillo, como se ilustra en el gráfico 3.12. La elección de qué distritos conforman cada clúster resulta de la solución óptima del modelo propuesto por Serpa (2014) el cual buscaba minimizar la distancia total recorrida.

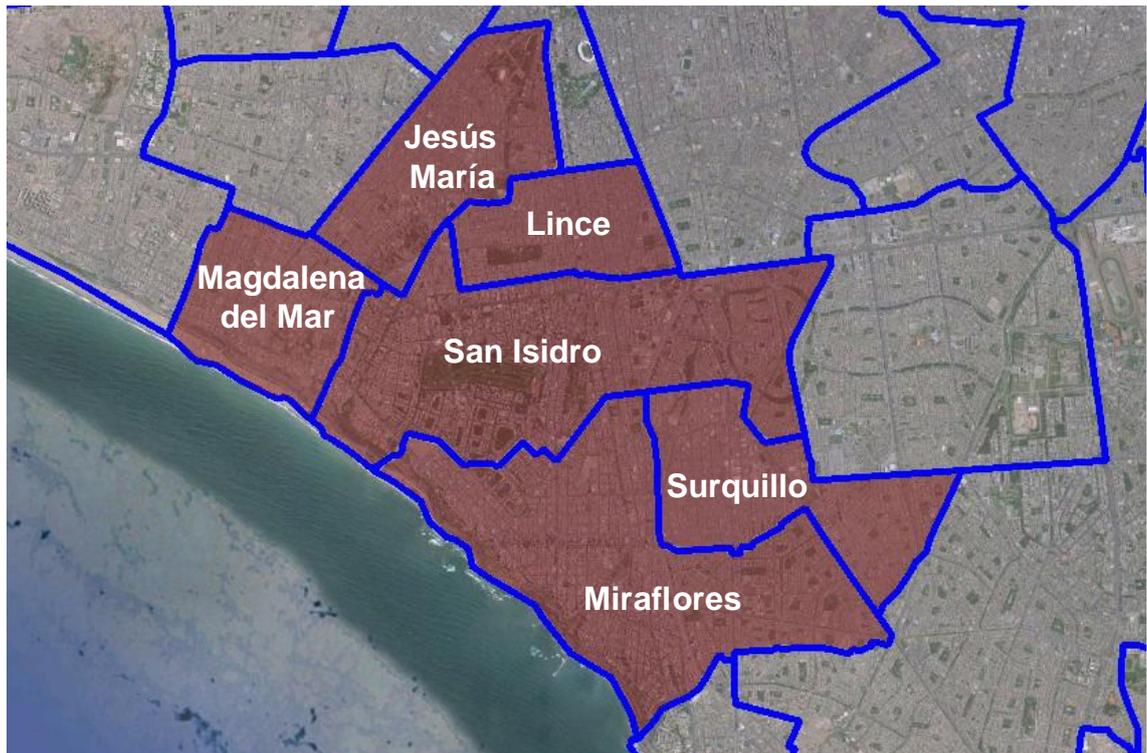


Gráfico 3.12. Mapa del clúster con almacén en San Isidro
Elaboración propia

3.3.2 Metodología del estudio

En las secciones anteriores se ha determinado la ubicación de los almacenes y la demanda deben que atender, pero no la cantidad ni la ubicación de los nodos. En rigor, cada vivienda en el clúster vendría a ser un cliente para el modelo, es decir cada depósito tendría que abastecer a miles de clientes, lo cual es inviable porque el modelo VRPTW demandaría un gran número de horas para encontrar la solución óptima, o tal vez días o meses. Además de esto, un modelo con un gran número de nodos podría requerir toda la memoria disponible del software LINGO como se muestra en el gráfico 3.13. Desde el punto de vista práctico, visitar cada vivienda implicaría un tiempo total de servicio muy grande el cual abarcaría gran parte del tiempo que se tiene disponible para la atención oportuna de los damnificados.

Para superar esta dificultad, se podrían agrupar viviendas y la sumatoria de sus demandas sería la asignada al grupo. El gráfico 3.14 ilustra un ejemplo de un clúster en donde hay que abastecer a 400 viviendas, pero para manejarlo como una red de menor cantidad de nodos se han agrupado en 16, con 25 viviendas cada uno. De este modo el número de nodos por clúster disminuirá y se espera que se elimine o reduzca el problema de capacidad del software. Más detalle y evidencia al respecto se discute en la sección 3.4.3. Sin embargo, al juntar muchas viviendas para formar un gran nodo, la demanda del mismo será mayor, lo cual genera otro problema. El

inconveniente está en que se incumpliría la restricción (9) del modelo VRPTW, la cual indica que la demanda de cada cliente deberá ser menor que la capacidad máxima de los vehículos asignados a dicho almacén para que puedan ser atendidos.

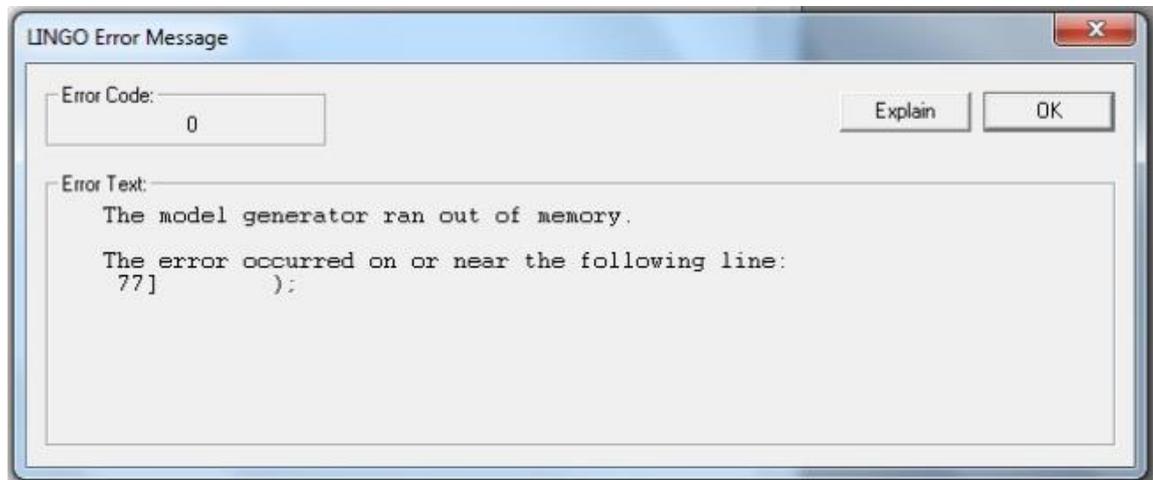


Gráfico 3.13. Mensaje de error por memoria en LINGO
Elaboración propia

Para superar la dificultad descrita, es necesario definir la capacidad de los vehículos que se usarán para transportar los *kits*. Contar con vehículos de poca capacidad volumétrica mejoraría la circulación del transporte pues tendrían menor dificultad cuando transiten por las calles de Lima, más aún si estas han sufrido daños causados por el terremoto. Sin embargo, implicaría formar nodos de pocas viviendas para que se cumpla la restricción (9) del modelo VRPTW, lo cual generaría una red con un gran número de estos nodos y provocaría el problema de memoria en el software previamente citado en el gráfico 3.13 o de complejidad computacional por el tiempo extremadamente grande que tomaría resolver el modelo.

La alternativa de comprar una cantidad de vehículos para usarla exclusivamente para la distribución de los bienes de ayuda humanitaria sería una inversión con elevado costo de oportunidad porque la flota estaría inmovilizada gran parte de su periodo de vida útil ya que los períodos de tiempo de la ocurrencia de terremotos en Lima y Callao son largos. Otra opción sería establecer una alianza con una entidad privada que se encargue de la prestación del servicio de distribución en el caso de que ocurra un terremoto, pero bajo la supervisión de las entidades públicas peruanas encargadas de la organización del reparto. Recordemos que esta tesis también tiene como objetivo indicar cuál es la cantidad óptima de vehículos de la flota.

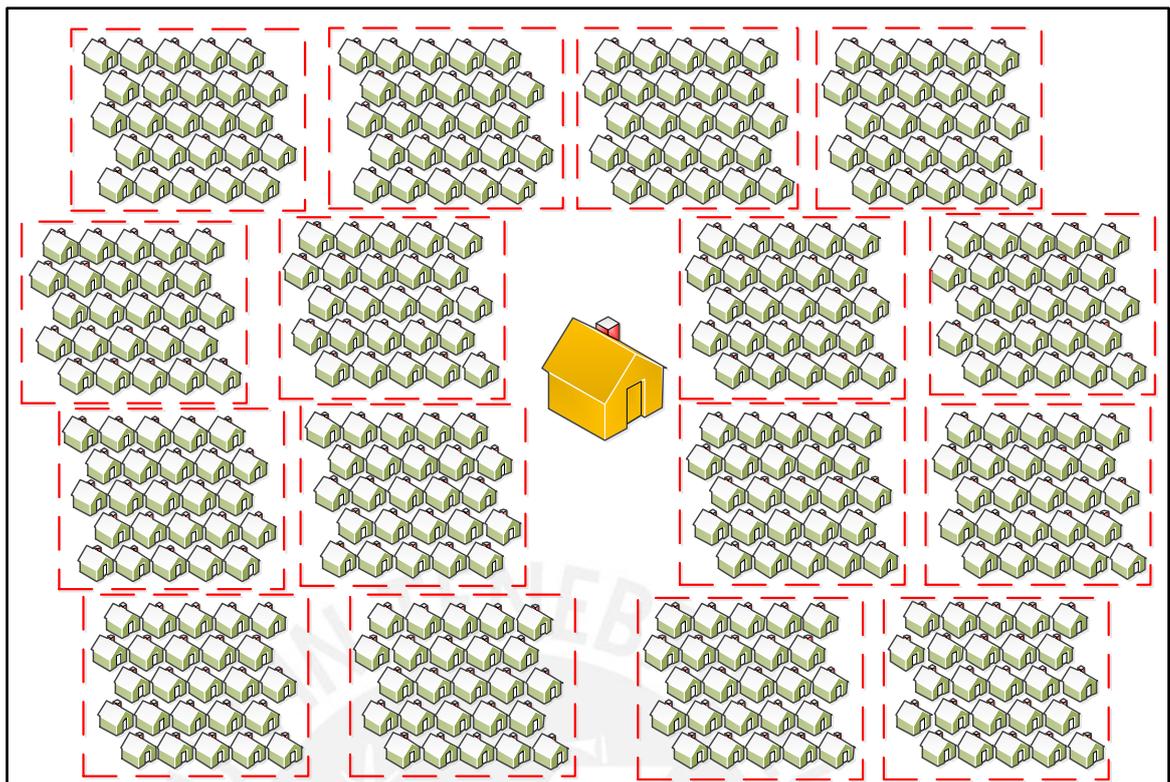


Gráfico 3.14. Ejemplo de clúster
Elaboración propia

En cuanto a la capacidad volumétrica de la flota vehicular a usar, se considerará una capacidad de 20 metros cúbicos. El gráfico 3.15 presenta un ejemplo de vehículo con esa capacidad. La razón de esta decisión es que estos vehículos tendrán menor dificultad para transitar por las calles y porque sería más fácil conseguirlos pues un gran número de empresas cuenta con vehículos de similar capacidad para sus tareas logísticas cotidianas. Según el INEI (2013), en el 2012 se contaba con un parque automotor de este tipo de camionetas de 57 606 unidades. Sin embargo, con los parámetros de número de nodos y capacidad vehicular recientemente definidos, resulta un modelo sin solución factible. Por ejemplo, Carabayllo cuenta con una demanda de 300 000 damnificados por lo que cada nodo necesitaría de 6 000 *kits*, es decir 420 metros cúbicos. Este valor es 21 veces mayor a la capacidad máxima del vehículo lo cual genera una solución no factible.

Para obtener soluciones factibles se deberá reducir la demanda de cada nodo y esto se logrará tomando tres medidas: creación de subestaciones por almacén, realizar más de un viaje de un vehículo a un mismo nodo y dividir al *kit* en grupos de bienes.



Gráfico 3.15. Ejemplo de vehículo

Fuente: <http://www.europa-camiones.com/news-camiones/a40826/version-caja-cerrada-20m3-fiat-ducato>

Primera medida

La primera medida consiste en crear subestaciones dentro de un mismo clúster y que de allí se reparta la ayuda a las zonas aledañas. En el gráfico 3.16 se ilustra un clúster con tres subestaciones y el alcance de cada una. En este caso el objetivo del almacén principal es abastecer constantemente a las subestaciones con *kits*. Cabe resaltar que estas subestaciones no cumplen la función de almacén permanentemente sino que son locales prestados por la municipalidad con capacidad suficiente para almacenar temporalmente los *kits* suministrados por el almacén principal del clúster tras el sismo y su pronta distribución.

No todos los clústers tendrán el mismo número de subestaciones, esto dependerá del número de *kits* que deberán de abastecer, incluso pueden haber clústers que no justifican tener subestaciones por tener baja demanda. El clúster con mayor demanda es Carabayllo con 300 000 *kits* por distribuir. Dividirlo en cinco subestaciones reduciría al 20% la demanda por nodo, lo cual lo pondría al mismo nivel que varios clústeres menores. El clúster de Ancón, con una demanda de 223 000 *kits*, sería más manejable dividiéndolo en cuatro subestaciones de 55 750 *kits* cada uno, similar a la demanda de cada estación del clúster de Carabayllo. Por esta razón, se considerará necesaria una subestación adicional por cada 60 000 *kits*.

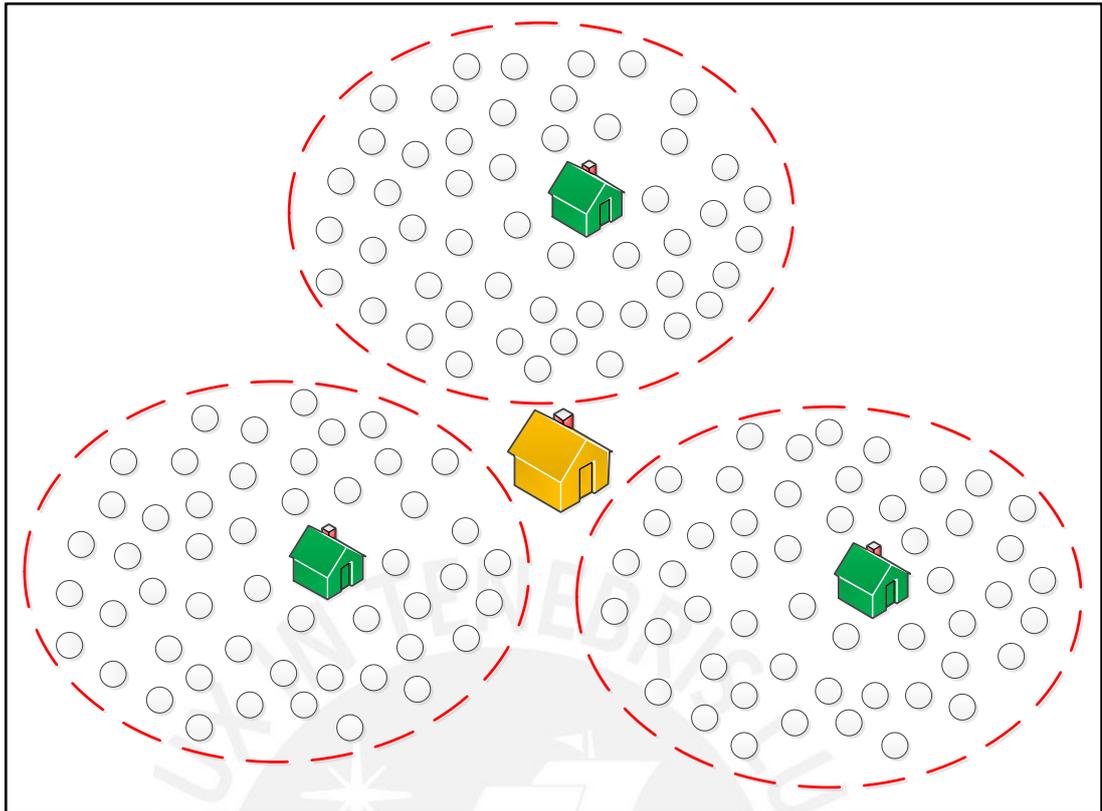


Gráfico 3.16. Almacén y subestaciones
Almacén (naranja), subestación (verde)
Elaboración propia

Cabe resaltar que modelos con una cantidad mayor a 50 nodos se vuelven muy complejos para ser resueltos computacionalmente (Toth y Vigo, 2002), por lo que la demanda de cada subestación será dividida entre dicha cantidad de nodos. Una cantidad menor de nodos disminuiría el tiempo de corrida; sin embargo, existe la posibilidad que incumpla la restricción (9). En el anexo 5 se muestra la cantidad de subestaciones por clúster (en total son 42) y la cantidad demandada en cada nodo de cada subestación.

La ubicación de estas subestaciones se determinará de tal forma que logren abarcar un espacio geográfico de dimensiones similares. Asimismo, serán en espacios de dominio municipal que cuenten con área suficiente para almacenar temporalmente los *kits* y para que los vehículos tengan un espacio para maniobrar. Estos espacios pueden ser municipalidades, comisarías, depósitos o incluso parques. Por otro lado, los vehículos que prestarán el servicio de reparto estarán dispersos por toda Lima Metropolitana y Callao, algunos haciendo viajes propios al giro de negocio de sus dueños y otros estacionados en sus locales. Una vez ocurrido el terremoto, estos vehículos se dirigirán al almacén central para empezar a abastecer a la población damnificada con ayuda humanitaria. Con la estrategia de las subestaciones, estos

vehículos ya no tendrán que ir hasta el almacén central más cercano, sino a la subestación más cercana, lo cual permitirá que estos estén listos para partir con mayor prontitud al haber más opciones a dónde dirigirse.

Segunda medida

La segunda medida consiste en que un vehículo visite más de una vez cada nodo y en cada visita entregue una porción del total demandado. Por ejemplo, en una red donde cada nodo tiene una demanda de 1000 *kits* y cada vehículo tiene capacidad para transportar también 1000 *kits*, según el modelo inicial, cada vehículo tendría una ruta con solo un nodo a visitar. Sin embargo, si existe la opción que los vehículos puedan hacer hasta cuatro viajes, la demanda por nodo se reduce a 250 *kits* por viaje y la ruta sería de cuatro nodos. De este modo, el número de vehículos necesarios por subestación será menor y también se utilizarán más los vehículos. Si bien es cierto, esta medida podría incrementar los costos; sin embargo, en el caso de ayuda humanitaria el objetivo de respuesta prima sobre el de minimizar costos como en empresas privadas (Marianov y ReVelle, 1995).

En cuanto al tiempo de espera de la población damnificada, no se vería afectado en gran medida pues mientras el vehículo esté entregando los bienes a los nodos restantes de su ruta, el personal asignado estará repartiendo los *kits* en el nodo respectivo y para cuando haya terminado aproximadamente, se espera que el vehículo ya estará de regreso con la segunda parte de *kits* por lo que no habrá mucho tiempo muerto esperando a la llegada de estos.

Para determinar el número de viajes a realizar por estación se considerará que cada subestación deberá tener a lo mucho 10 vehículos. Esto es porque también se está buscando tener el menor número de vehículos posible. El número de viajes a realizar por cada vehículo se calculará de la siguiente manera:

$$\text{Demanda por viaje por nodo} = \frac{\text{Demanda por nodo}}{\text{Cantidad de viajes}}$$

$$\text{Cantidad de nodos por ruta} = \frac{\text{Capacidad de cada vehículo}}{\text{Demanda por viaje por nodo}}$$

$$\text{Cantidad de vehículos} = \frac{\text{Cantidad total de nodos [50]}}{\text{Cantidad de nodos por ruta}} \leq 10$$

$$\text{Cantidad de viajes} \geq \frac{\text{Demanda por nodo} \times \text{Cantidad total de nodos}}{\text{Capacidad de cada vehículo} \times 10}$$

Este cálculo se realizará para cada subestación teniendo en cuenta lo siguiente: la demanda por nodo calculada en el anexo 5, el número total de nodos igual a 50 y la capacidad de vehículo de un vehículo de 20 metros cúbicos expresada en número de *kits*.

Tercera medida

Por último, la tercera medida es dividir el *kit* y repartirlo por separado para que un vehículo pueda abarcar una mayor población damnificada. El *kit* completo tiene un volumen de 0.07 metros cúbicos por persona, por lo que el vehículo con capacidad de 20 metros cúbicos podría transportar hasta 285 *kits* en cada ruta. Algunos de los bienes a repartir son para distribución personal, como las frazadas o colchas, mientras que otros bienes son familiares, como las carpas o bidones. Para llevar un mejor control se dividirá en dos grupos: uno para bienes de uso personal, con un volumen de 0.017 metros cúbicos, y otro para bienes de uso familiar, con un volumen de 0.052 metros cúbicos; asumiendo que los bienes familiares se dividirán entre seis personas. Para que los grupos no difieran tanto, se dividirá el grupo familiar en dos, uno de 0.03 y otro de 0.022 metros cúbicos. En la tabla 3.6 se muestra la división de estos grupos, indicando el volumen que ocupa cada uno.

Con esta división no se pretende tener vehículos especializados para cada grupo, pues se tendría la misma flota que con el método original, sino que se realicen exclusivamente entregas de un grupo de artículos y al finalizar esto pasar al siguiente grupo. Por ejemplo, con esta división, cada vehículo de 20 metros cúbicos de capacidad podrá transportar un total de 1147 *kits* del grupo A. Esto quiere decir que podrá abarcar mayor número de nodos por ruta, por lo que la entrega de estos bienes sería más rápida.

Tabla 3.6. División del *kit*

Grupo	Ítem	Volumen por persona (m³)
A	Frazada (comprimida)	0.006
	Colcha de 1.5 plazas	0.003
	Muda de ropa	0.006
	<i>Kit</i> de higiene	0.002
B	Carpa familiar para seis personas	0.030
C	Bidón de plástico con tapa	0.003
	Caja de utensilios de cocina y enseres	0.019

Elaboración propia

Para unir esta tercera medida con la segunda, será necesario realizar el cálculo del número de viajes para grupo en cada subestación como se muestra en los anexos 6, 7 y 8. Sin embargo, al redondear los resultados de los cálculos para que sean enteros, da como resultado que en 7 clústers hay un número distinto de vehículos que se necesitarían para cada grupo en cada subestación. No tendría sentido tener más vehículos para repartir un grupo de bienes y luego tenerlo inutilizado para el siguiente. Para que la cantidad de vehículos de la flota sea igual en cada reparto, se tomará el menor número de vehículos calculado en los grupos, y en los que necesiten mayor cantidad de estos, se les aumentará el número de viajes hasta que la flota necesaria sea la misma. En la tabla 3.7 se muestra el resultado del número de viajes a realizar en cada uno de los clústers, para cada grupo. La distribución de estos grupos será por etapas utilizando la misma flota de vehículos. El orden en que serán suministrados a la población se determinará en el siguiente capítulo según el tiempo de viaje de cada ruta.

Tabla 3.7. Ajuste de la cantidad de viajes

Clúster	Cantidad de vehículos	Viajes para el grupo A	Viajes para el grupo B	Viajes para el grupo C
Ancón	10	5	7	9
Ate	10	3	4	5
Carabaylo	10	6	7	10
Chaclacayo	10	3	4	5
Cieneguilla	10	5	7	9
Comas	10	4	5	7
La Molina	10	3	4	5
La Victoria	6	2	2	3
Lima	8	3	3	4
Los Olivos	6	2	2	3
Lurigancho	10	5	7	9
Pachacámac	10	5	6	8
Punta Hermosa	10	6	7	9
San Borja	4	1	2	2
San Isidro	7	2	2	3
San Juan de Lurigancho	10	5	7	9
San Martín de Porres	10	3	4	5
San Miguel	8	1	2	2
Santa Rosa	8	2	3	3
Santiago de Surco	10	3	4	5
Ventanilla	10	6	7	10
Villa María del Triunfo	10	3	4	5

Elaboración propia

Para poder definir la cantidad de vehículos y las rutas que recorrerán en cada uno de los 22 clústeres, se trabajará según la siguiente metodología:

- Se presentará el escenario más crítico en el cual fueron definidos el número y ubicación de los almacenes de ayuda humanitaria no alimentaria. En este escenario, mostrado en la sección 3.1.2, se desarrollará el modelo que busque optimizar las rutas de distribución de la ayuda.
- Según este escenario crítico se calcula el número total de damnificados por distrito para obtener la demanda total por almacén. Esta demanda total será distribuida uniformemente entre los nodos que tenga cada almacén.
- Se escogerá el número necesario de subestaciones y de viajes a realizar por cada vehículo, así como la capacidad de estos vehículos en cada subestación y el agrupamiento de *kits* por tipos.
- Con ayuda de Google Earth, se ubicarán los nodos en el mapa para cada subestación. Este proceso se hará repartiendo nodos uniformemente en todo el espacio geográfico de la subestación.
- Con ayuda de Global Mapper, se transformarán las coordenadas de los nodos en Google Earth a UTM, es decir coordenadas en plano cartesiano X Y, y se exportarán a Excel. Con estas coordenadas se calcula la longitud de los arcos que unen cada nodo.
- Se formulará un modelo de programación lineal entera mixta con el objetivo de minimizar costos y cumplir con las ventanas de tiempo de cada cliente. El modelo algebraico se formulará también en el lenguaje de modelado de LINGO, versión 13. Se resolverá el modelo para cada subestación y con esto se obtendrá el plan detallado de las rutas que recorrerá cada vehículo.
- Se realizará un análisis de los resultados obtenidos, evaluando cuánto han sido los beneficios en términos de medidas de respuesta humanitaria: distancia y tiempo.

3.3.3 Supuestos del modelo

En esta sección se detallarán los supuestos del modelo de programación lineal mixta que se formulará. En cuanto a los depósitos centrales, se trabajará bajo el supuesto que los 22 almacenes ya se encuentran construidos, operativos y con la cantidad necesaria de bienes de ayuda humanitaria para satisfacer la demanda de damnificados estimada. Cabe resaltar que se consideraron zonas con buena calidad de suelo, conforme al estudio del CISMID (2005) citado también en el acápite 3.1 y en el anexo 2, y que los depósitos se mantendrán en pie luego del movimiento telúrico. Los 22 almacenes se ubicarán en una zona céntrica de los distritos ya

definidos en el anexo 4. Esta ubicación dependerá de la disponibilidad de terreno en el distrito pero se recomienda sea en el lugar menos vulnerable cercano al centro de gravedad de las subestaciones.

La red se considerará simétrica, es decir, la distancia y tiempo empleado en dirigirse de un nodo "i" a un nodo "j", será el mismo para ir de "j" a "i". Asimismo, se considera que existe una ruta posible que conecte a cada nodo con todos los demás de la red y que los vehículos puedan transitarla. Para la distancia a recorrer entre nodos se tomará la distancia más corta entre los nodos y se multiplicará por un factor. Este factor representa el incremento en la distancia causado por la misma estructura de las calles por tomar alguna ruta alterna por algún bloqueo. Este factor se calcula como se muestra en el gráfico 3.17 el cual sería $\sqrt{2}$. Se considera la distancia más corta como la hipotenusa de un triángulo recto isósceles, y la distancia a recorrer es la suma de los catetos. Tras calcular la matriz con las distancias más cortas entre cada uno de los nodos se multiplicarán por el factor $\sqrt{2}$, para así obtener un resultado más real de lo que se recorrerá.

Asimismo, se asumirá que los vehículos en promedio son similares, de modo que la flota sea homogénea. Para este estudio se considerarán vehículos de 20 metros cúbicos de capacidad y que se cuenta con el total del número de vehículos calculados que se necesitarán. Estos vehículos tendrán que lidiar con el tráfico y con algunas vías bloqueadas por lo que se considerará que viajarán a una velocidad promedio de 30 kilómetros por hora. Además, se considerará que los vehículos cuentan con combustible suficiente para realizar los viajes y no se detendrán en grifos para abastecerse. El tiempo de servicio de estos vehículos al llegar a cada nodo será el de descargar la cantidad de bienes determinados para que un tercero empiece a distribuirlo a la población. El tiempo necesario para realizar esta tarea sería 10 minutos en promedio.

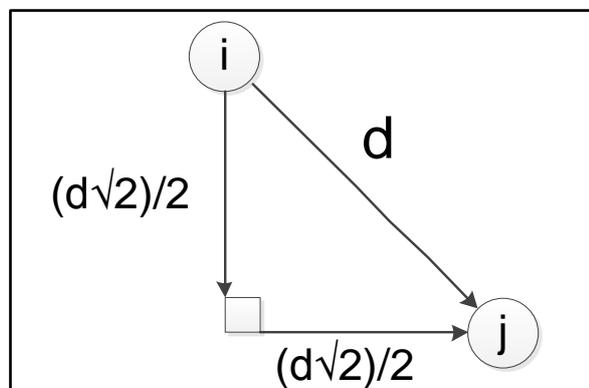


Gráfico 3.17. Cálculo de factor de distancia
Elaboración propia

Otra importante asunción que se hará es que la cantidad calculada será la demandada por la población afectada. En el escenario real, una vez ocurrido el sismo y según indica el protocolo del POE se realizará un censo rápido para determinar la cantidad total demandada por distrito. Para el presente estudio, se asumirá que el resultado de este censo será igual a lo calculado en la sección 3.1.3. La cantidad demandada en cada clúster será distribuida en partes iguales en cada una de las subestaciones que se tenga, y dentro de ella, se distribuirá de manera uniforme por espacio geográfico, obteniendo de esta manera la demanda de cada nodo. Esta distribución uniforme es factible pues el detalle de tipos de suelo, tipos de vivienda y cantidad de población están disponibles a nivel de distrito. Estas características no cambian de manera significativa de una urbanización a una adyacente, pero sí se ha determinado, en algunos casos, que la variación es notoria de un distrito a otro, como se puede observar en el anexo 2.

Los bienes del grupo A serán entregados de manera personal, identificándose y registrando la entrega para evitar que se reciba más de lo necesario. Para los grupos B y C, que son comunitarios, se considerará la entrega de uno de ellos por cada seis damnificados. Esto porque la capacidad de la carpa es para seis personas y porque es el número promedio de personas damnificadas por vivienda inhabitable, según el total de afectados mostrados en el anexo 5 y la cantidad de viviendas inhabitables según la tabla 3.4. El tiempo empleado para la entrega y registro de cada grupo de bienes será de un minuto para los personales y de cinco minutos para los comunitarios. El tiempo máximo que debe pasar desde que sucede el movimiento telúrico hasta que toda la población damnificada tenga el *kit* completo de ayuda humanitaria es de 72 horas según INDECI (2010). Se considerarán que las primeras 10 horas serán para realizar un censo general para determinar el número de damnificados y las coordinaciones necesarias previas a empezar la distribución propiamente de los bienes de ayuda humanitaria. Dentro de estas 10 horas también se considera que los almacenes principales ya abastecieron cada subestación con bienes suficientes como para una ronda y que ya se encuentra personal listo para empezar la distribución en cada nodo.

Los almacenes centrales deberán de estar surtiendo de manera constante de bienes de ayuda humanitaria a las subestaciones. En el gráfico 3.18 se ilustra cómo los almacenes centrales envían vehículos cargados con *kits*, los dejan en las subestaciones, y regresan vacíos. A partir de este punto se iniciará el recorrido de las rutas óptimas calculadas. Cada vehículo partirá de la subestación a la que fue asignado y se detendrá en cada nodo de su ruta para descargar los bienes de ayuda

humanitaria. Este proceso de descarga demoraría en promedio 10 minutos. Terminada la ruta, el vehículo regresa a la subestación para abastecerse de más bienes para el siguiente viaje programado. Al finalizar todos los viajes del primer grupo de bienes se procederá a empezar con el siguiente grupo con la misma lógica, y así hasta el último grupo. En el gráfico 3.19 se muestra cómo los vehículos se cargan de bienes y dejan al almacén de la subestación vacío, luego realizan su ruta asignada y cuando están de regreso el almacén está de nuevo lleno. Esto último ocurre porque el vehículo del almacén central ya ha regresado a la subestación a surtirla de más bienes suficientes para un viaje adicional.

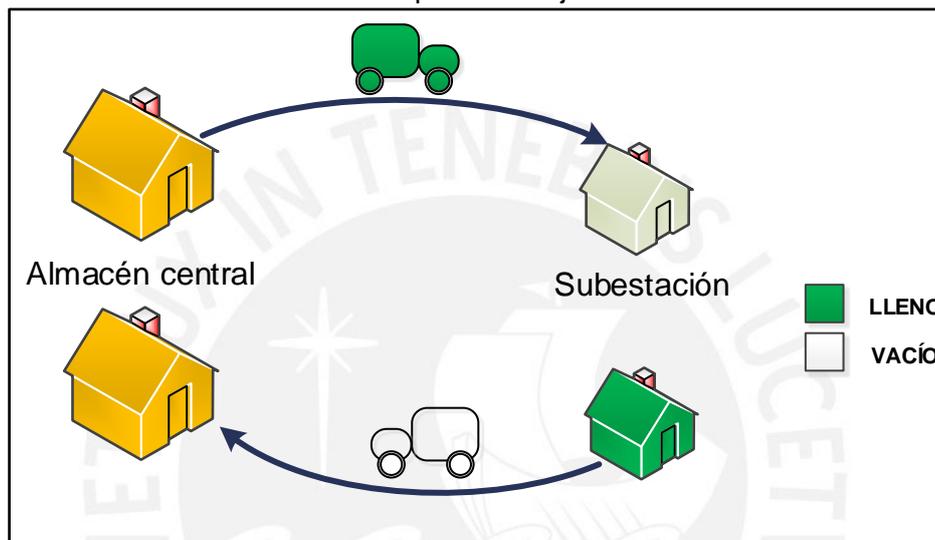


Gráfico 3.18. Abastecimiento de subestaciones
Elaboración propia

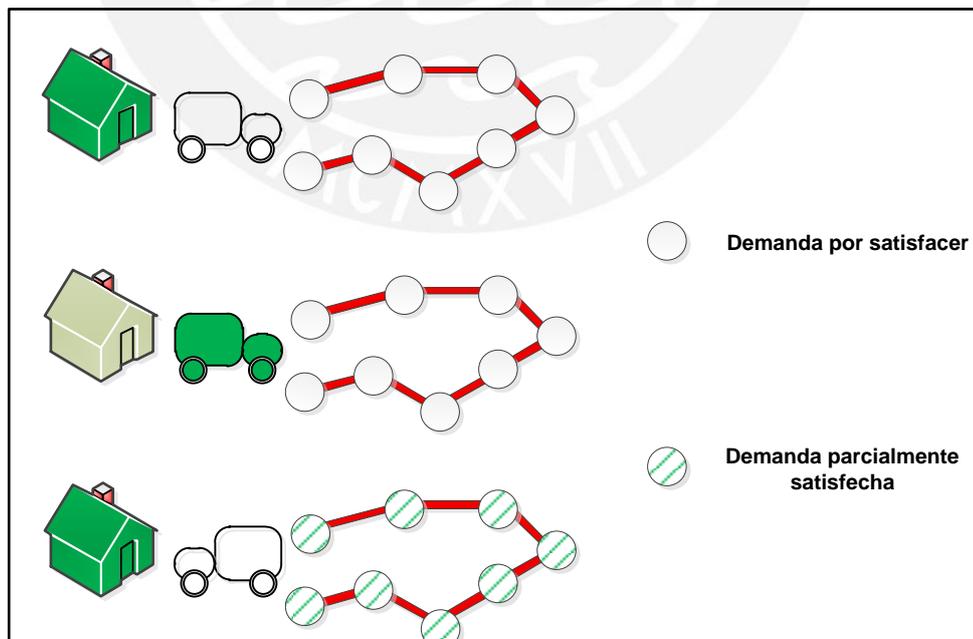


Gráfico 3.19. Abastecimiento de nodos
Elaboración propia

En cada nodo se encontrará personal que colabore con la descarga de los bienes provenientes de los vehículos. Estos ayudantes estarán ubicados en un lugar céntrico, como un parque, como se ilustra en el gráfico 3.20, y armarán una tienda para la distribución. Las personas afectadas de la zona deberán acercarse a esta tienda para la recepción de los bienes. Para recoger cada grupo de bienes deberán llenar una hoja de constancia de entrega. Esta acción demorará un minuto por persona, para el grupo A, y cinco minutos por comunidad, para los grupos B y C. De este modo se evitarán tiempos muertos para los vehículos, pues en el tiempo que se esté entregando los bienes a las personas, ya habrá partido y estará en camino hacia los demás nodos.

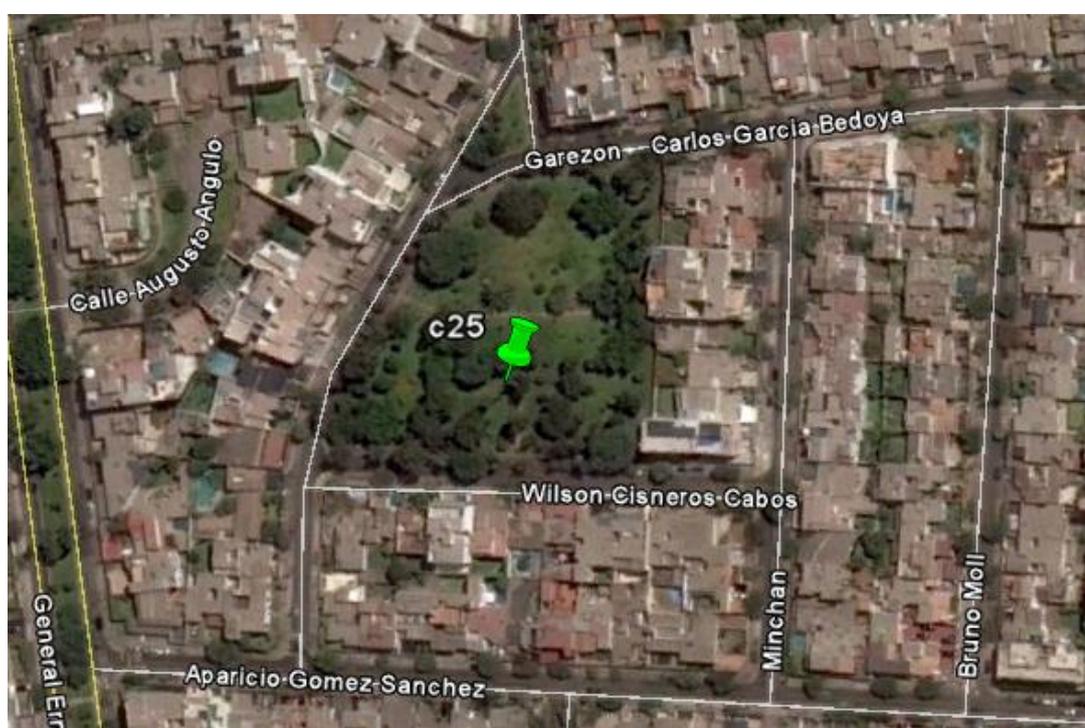


Gráfico 3.20. Ejemplo de nodo en parque
Elaboración propia

Para garantizar que se cumpla con la norma de las 72 horas se empleará un modelo con ventanas de tiempo duras, es decir no se permitirá la distribución de ayuda pasada este periodo de tiempo. Se realizará un modelo por cada subestación, para cada grupo de bienes de ayuda humanitaria, y cada uno de estos deberá tener ventanas de tiempo definidas para cada nodo. En el anexo 9 se muestra la ventana de tiempo superior a utilizar para cada uno de los modelos. Este cálculo se realizó de la siguiente manera:

$$\frac{\frac{\text{Cantidad de nodos}}{\text{Ruta}} * 10 + 15 + \left(\frac{\text{Cantidad de nodos}}{\text{Ruta}} + 1 \right) * 5}{60} * 1.5$$

Esto representa el tiempo que demorará un vehículo en hacer una ruta completa para un grupo. La primera multiplicación indica el tiempo total que demorará un vehículo en descargar los bienes cada vez que llega a un nodo. Se consideran 15 minutos como el tiempo de carga de bienes al inicio de la ruta. El último producto representa el tiempo de movilización, considerando que demora en promedio 5 minutos entre cada nodo de la ruta, hasta regresar a la subestación. Toda esta expresión se multiplica por un factor de 1.5 que contempla demoras en alguno de los conceptos ya mencionados. Este resultado se usará como ventana superior para cada nodo en cada subestación para cada grupo.

Finalmente, estos valores se multiplican por número de viajes por vehículo para obtener la duración total estimada para cada grupo, en cada subestación; estos resultados se muestran en el anexo 10. Se comprueba que en ningún caso la duración total supera las 65 horas, lo que indica que el uso de las ventanas de tiempo del anexo 9 garantiza que se cumpla con la norma de las 72 horas.

3.4 Planteamiento del modelo

En esta sección se determinarán los parámetros, así como el modelo que se utilizará para llegar a la solución del problema planteado para su posterior análisis. Se tendrán en cuenta los supuestos asumidos así como el escenario crítico previamente descrito. Cabe resaltar que es un modelo de naturaleza determinística, es decir, los parámetros no son variables aleatorias.

3.4.1 Parámetros

Los parámetros, en un modelo de programación lineal, son los datos de entrada que interactuarán con las variables para poder hallar la solución óptima. Según la explicación en la sección 3.2.2, los parámetros de un VRPTW son: demanda de cada nodo, capacidad del vehículo, costo del envío para cada arco, ventanas de tiempo inferior y superior, tiempo de servicio por nodo, y tiempo que demora ir de un nodo a otro.

La demanda de cada nodo, para cada subestación se muestra en los anexos 6, 7 y 8 expresada en número de *kits* de cada grupo que se necesitan. La capacidad vehicular ya se determinó como 20 metros cúbicos, y la cantidad de grupos que pueda transportar dependerá del volumen de cada uno. Las ventanas de tiempo superiores se muestran en el anexo 9, mientras que las inferiores serán iguales a cero. El tiempo de servicio por nodo en el contexto de este modelo es el tiempo de la descarga de bienes, cuyo valor promedio se fijó en 10 minutos.

Con ayuda de Google Earth se ubica cada uno de los nodos en el mapa de Lima Metropolitana y Callao, para luego exportarlo a un libro de Excel utilizando Global Mapper. Al tener las coordenadas en plano cartesiano de cada nodo, se calculará la distancia entre dos nodos de la siguiente forma:

$$\text{Para } P_1 = (x_1, y_1) \text{ y } P_2 = (x_2, y_2)$$

$$\text{Distancia } (P_1, P_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

En el anexo 11 se muestran las coordenadas de nodos para cada subestación de Ancón como ejemplo. Cabe resaltar que las distancias calculadas están expresadas en kilómetros y ya consideran el factor de $\sqrt{2}$, explicado en los supuestos del modelo, multiplicando a cada distancia inicial. Esto representa entonces, el estimado que recorrerá cada vehículo cuando circula por un arco determinado.

Con base en la distancia entre nodos se calcula el tiempo de transporte entre nodos al multiplicarlo por una velocidad promedio del vehículo. Para el modelo consideraremos que este medio de transporte se movilizará a 30 kilómetros por hora. Esto se debe principalmente a que algunas calles estarán dañadas, lo cual retrasará el traslado de un nodo a otro. El costo que implica la elección de cada arco está expresado en kilómetros y es lo que se busca minimizar en la función objetivo.

3.4.2 Modelo en el lenguaje de modelado de LINGO

Con toda la data de entrada detallada en la sección anterior se diseñó el modelo VRPTW (explicado en la sección 3.2.2). El software utilizado para ejecutar este modelo es LINGO, versión 13. Cabe resaltar que se necesitarían 126 modelos distintos, resultantes de cada una de las 42 subestaciones y también por cada uno de los tres grupos de bienes. Sin embargo, esto se puede reducir a 42 modelos pues el tamaño de la flota es constante en cada subestación. El modelo utilizando el lenguaje de programación de LINGO se detalla a continuación.

Las variables de decisión que se emplearán son: X_{ijk} que representa la decisión de tomar o no un arco ij con el vehículo k ; y W_{ik} que representa el instante de tiempo en el que inicia el servicio en el nodo i por el vehículo k . Estas variables y los parámetros serán agrupados en *sets* para su posterior uso en la función objetivo y restricciones. Los *sets* a utilizar se muestran en el gráfico 3.21 en donde se observa lo siguiente:

- Un *set* primitivo “Nodos” con extensión 51, conformador por un depósito y 50 clientes, cuyos atributos son “demanda”, “inicio”, “fin” y “servicio” para la demanda de

cada nodo, las ventanas de tiempo inferior y superior, y el tiempo de servicio de cada nodo respectivamente.

- Un *set* primitivo “Carros” con extensión según la subestación, igual al número de vehículos a usar.
- Un *set* derivado “Matriz1” formado por dos *sets* “Nodos”, cuyos atributos son “costo” y “el tiempo entre nodos” para cada kilómetro y los tiempos de traslado de cada vehículo.
- Un *set* derivado “Matriz2” formado por los *sets* “Nodos” y “Carros”, cuyo atributo es la variable W .
- Un *set* derivado “Matriz3” formado por dos *sets* “Nodos” y un *set* de “Carros”. Este *set* tiene como atributo la variable X , que es la variable de decisión X_{ijk} .

```
Sets:  
  
Nodos/1..51/:demanda, inicio, fin, servicio;  
Carros/1..10/;  
Matriz1(Nodos,Nodos):costo, tiempo;  
Matriz2(Nodos,Carros):W;  
Matriz3(Nodos,Nodos,Carros):X;  
  
EndSets
```

Gráfico 3.21. Sets a usar en LINGO
Elaboración propia

Todos los parámetros ya mencionados se encuentran en libros de Excel, debidamente definidos, los cuales serán importados por LINGO con ayuda de la herramienta @OLE. Esta misma herramienta permitirá exportar los resultados de las variables a esos libros de Excel para facilitar su futuro análisis. Con los *sets* y la data ya definidos, se procederá a la realización del modelo, propiamente dicho, utilizando el lenguaje de modelado de LINGO.

En el gráfico 3.22 se muestra la programación en LINGO del modelo VRPTW. El número (1) representa la función objetivo, mientras que los siguientes indican el número de restricción según el modelo explicado en la sección 3.2.2. La restricción (6) ya se encuentra expresada en su forma lineal y se ha empleado un valor M igual a 999. Las restricciones (7) y (8) están expresadas en dos sentencias separadas, una para la ventana inferior y otra para la ventana superior. Se agregó una restricción adicional al modelo original para impedir que las variables X_{ijk} tomen el valor de 1.

```

!(1);
MIN = @SUM(Matriz1(i,j):costo(i,j)*@SUM(Carros(k):X(i,j,k)));
!(2);
@FOR(Nodos(i)|i#NE#1:@SUM(Matriz2(j,k):X(i,j,k))=1);
!(3);
@FOR(Carros(k):@SUM(Matriz1(i,j)|i#EQ#1:X(i,j,k))=1);
!(4);
@FOR(Matriz2(j,k):@SUM(Nodos(i):X(i,j,k)-X(j,i,k))=0);
!(5);
@FOR(Carros(k):@SUM(Matriz1(i,j)|j#EQ#1:X(i,j,k))=1);
!(6);
@FOR(Matriz3(i,j,k)|j#NE#1:W(i,k)+servicio(i)+tiempo(i,j)-W(j,k)
<=(1-X(i,j,k))*999);
!(7);
@FOR(Matriz2(i,k)|i#NE#1:@SUM(Nodos(j):inicio(i)*X(i,j,k))<=W(i,k));
@FOR(Matriz2(i,k)|i#NE#1:@SUM(Nodos(j):fin(i)*X(i,j,k))>=W(i,k));
!(8);
@FOR(Matriz2(i,k)|i#EQ#1:W(i,k)>=inicio(i));
@FOR(Matriz2(i,k)|i#EQ#1:W(i,k)<=fin(i));
!(9);
@FOR(Carros(k):@SUM(Matriz1(i,j):demanda(i)*X(i,j,k))<=capacidad);
!(10);
@FOR(Matriz3(i,j,k):@BIN(X(i,j,k)));
!Evitar viajes entre nodos "i-i";
@FOR(Matriz3(i,j,k)|i#EQ#j:X(i,j,k)=0);

```

Gráfico 3.22. Modelo en LINGO
Elaboración propia

Cada subestación tendrá 50 clientes y un depósito, es decir 51 nodos, y el número de carros variará en cada subestación. Por ejemplo, un modelo con 10 vehículos tendrá un total de 26 010 variables y 27 111 restricciones. Es por este motivo que es necesario contar con la versión completa de LINGO para que se puedan generar ese número de restricciones.

3.4.3 Limitaciones del software

El principal problema identificado en la sección 3.3.2 fue el tiempo excesivo para hallar el valor óptimo de la función objetivo en un modelo VRPTW y dicho tiempo aumenta conforme se incrementa el número de nodos en la red. Se realizaron simulaciones para escenarios de 5, 10, 14 y 20 nodos. En el gráfico 3.23 se ilustra el tiempo en segundos que demoró el software en obtener la solución óptima variando el número de nodos. El objetivo de evaluar estos escenarios no es calcular el tiempo exacto que demorará en hallar el óptimo un modelo con un número “n” de nodos, sino determinar que no es una relación lineal y que la curva de este gráfico se puede modelar mejor como una ecuación polinómica o exponencial. Esto se explica pues el

modelo VRPTW es calificado como *NP-hard* debido a su complejidad computacional (Toth y Vigo, 2002).



Gráfico 3.23. Duración de corrida según la cantidad de nodos
Elaboración propia

Además de esto, cada vehículo k tiene una capacidad asignada, la cual puede estar expresada en unidades, peso, volumen, etc. Con esta capacidad deben abastecer a un conjunto de clientes con una demanda determinada. Dependiendo del valor de estos parámetros se puede tener un estimado de cuántos clientes podrán ser atendidos en una sola ruta. De este modo se calcula cuántos vehículos deberían conformar la flota, lo cual también incide en el tiempo de solución del modelo porque tendría más variables enteras. Para comprobar que la duración de corrida depende del número de vehículos se realizaron modelos de 20 clientes con 2, 3 y 5 vehículos tal y como se muestran en el gráfico 3.24. Se puede observar cómo las duraciones no tienen un comportamiento lineal con respecto al número de vehículos. Por ejemplo, se observa en el gráfico 3.24 que el tiempo para obtener el óptimo del modelo con cinco vehículos es más de 40 veces lo que demoró un optimizar el modelo con tres vehículos, a pesar de que el incremento en el número de variables es solo de 67%.

El comportamiento observado ocurre porque una de las determinantes relevantes del tiempo requerido para resolver un modelo de programación entera es el número de variables. Así por ejemplo, si se tiene un problema de programación entera binaria simple de n variables, existen 2^n soluciones a considerar (Hillier, 2010). Debido a este comportamiento exponencial, aún las computadoras más eficientes son incapaces

de hallar el óptimo en un tiempo razonable cuando n es relativamente grande, o en algunos casos, medianamente grande.

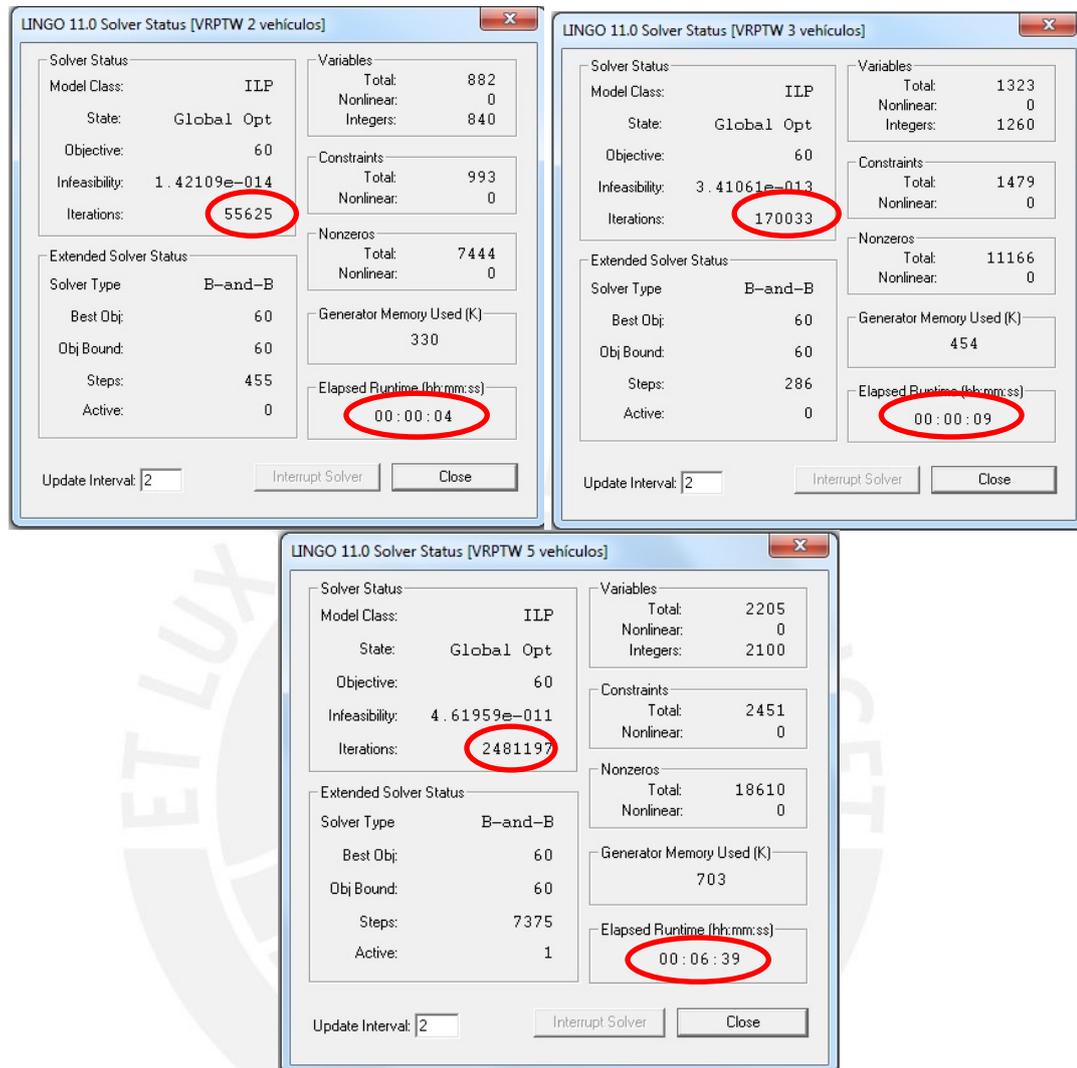


Gráfico 3.24. Comparación de resultados según el número de vehículos
Elaboración propia

Se observó también que el comportamiento de los algoritmos calcula una solución factible inicial cuyo valor de la función objetivo mejora rápidamente hasta cierto tiempo y luego se mantiene, o mejora muy poco, por un tiempo más largo hasta que logra hallar la solución óptima. En el gráfico 3.25 se ilustra un ejemplo de un modelo de 50 nodos. El software obtuvo una primera solución factible de 165 kilómetros totales recorridos a los 20 segundos de iniciado el algoritmo. El valor de la función objetivo se redujo a 77 kilómetros 5 segundos después y a los 45 segundos de iniciado tuvo un valor de 52 kilómetros. A los 12 minutos halló una solución factible con valor de 44 kilómetros y esto se mantuvo por 6 horas que fue cuando mejoró a 41 kilómetros. Finalmente, a las 10 horas de iniciado, minimizó el valor a 40.3 kilómetros. Estos resultados se resumen en la tabla 3.8 en donde se aprecia que la

mejora más significativa, en este caso, ocurrió en los primeros quince minutos y tal vez es un valor bastante cercano al óptimo, el cual se demoraría en hallar más de quince horas.

Tabla 3.8. Resumen de la evolución de la función objetivo

Tiempo (horas)	Valor función objetivo (km)
0.006	165.0
0.007	77.0
0.013	51.9
0.200	44.0
6.000	41.0
10.000	40.3
15.000	40.3

Elaboración propia

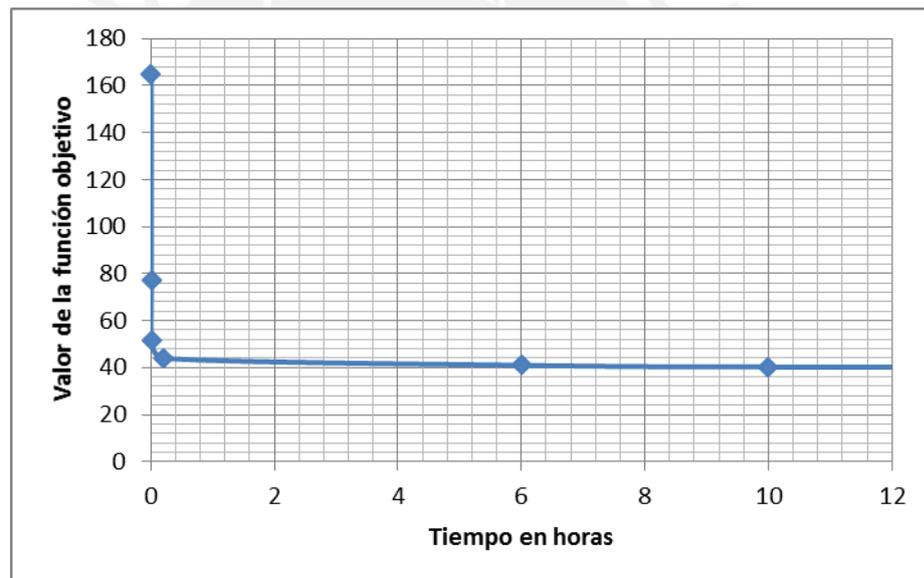


Gráfico 3.25. Variación de la función objetivo en el tiempo

Elaboración propia

El objetivo de estos resultados es ver el comportamiento que tiene la función objetivo con respecto al tiempo que tarda encontrar la primera solución factible y lo que demora encontrar la solución óptima del modelo. Se ejecutaron los modelos de cada subestación y en varios casos se obtuvo la primera solución factible después de muchas horas. El problema es que esta opción de ruteo era muy ineficiente y para lograr que llegue a un valor de función objetivo aceptable y se estabilice como revela la gráfica 3.25 iban a pasar muchas horas más. Asimismo, algunos modelos se

ejecutaron por más de veinte horas sin llegar siquiera al primer factible. Por este motivo se optará por recurrir a una heurística que se acomode al problema planteado.

3.4.4 Elección de la heurística

Como se indicó en la sección anterior, se optará por resolver los modelos utilizando heurísticas, pero como no es un método exacto, no podemos garantizar de antemano cuál es la mejor heurística. Por esta razón seleccionaremos una muestra aleatoria de las subestaciones y aplicaremos las tres heurísticas descritas en la sección 1.2. Según eso se escogerá una heurística para el total de subestaciones.

Debido a la naturaleza del problema planteado, se puede hacer el uso de las heurísticas en su forma básica aplicada a VRP porque las ventanas de tiempos son las mismas en cada nodo y se tiene como parámetro el número de vehículos, así como la capacidad de los mismos.

Las subestaciones seleccionadas son: Ancón 1, Carabaylo 3, Cieneguilla 2, La Molina 1, Lurigancho 3 y Villa María del Triunfo 2. En la tabla 3.9 se muestran los resultados luego de aplicar las tres heurísticas en cada subestación y también los resultados en LINGO obtenidos tras una hora de corrida. En los tres casos se obtiene un mejor resultado que el calcular tras ejecutar el modelo exacto por más de una hora en LINGO. Comparando entre las heurísticas propuestas, se observan ciertas variaciones y para determinar si es algo significativo se realizará una prueba de hipótesis pareada.

Tabla 3.9. Resumen de resultados por cada heurística

Subestaciones	Método exacto⁽¹⁾ (km)	Asignar primero rutear después (km)	Ahorros (km)	Vecino más cercano (km)
Ancón 1	95.93	45.06	43.51	48.09
Carabaylo 3	80.03	57.55	51.63	54.43
Cieneguilla 2	171.66	109.88	105.33	111.19
La Molina 1	97.41	66.55	63.62	71.15
Lurigancho 3	72.76	53.44	49.86	56.62
VMT 2	Infactible ⁽²⁾	50.72	52.02	58.19

⁽¹⁾ Se resolvió el modelo durante una hora y aún no llegó al óptimo

⁽²⁾ Se resolvió el modelo durante una hora y aún no obtuvo una solución factible

Elaboración propia

Se formularán tres pruebas de hipótesis para determinar si existe diferencia significativa entre las heurísticas. Como las muestras son pequeñas y se desconoce la normalidad de la variable distancia en la población, la prueba apropiada es el *test* no paramétrico de Wilcoxon que evalúa si existe una diferencia significativa entre dos muestras pareadas (Wilcoxon, 1945).

Dada una muestra de tamaño N con los siguientes pares:

$$(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_N, Y_N)$$

Gibbons y Chakraborti (2011) explica que este test busca probar la hipótesis nula:

$$H_0: M_D = M_0$$

A partir de las N diferencias $D_i = X_i - Y_i - M_0$ se ordenan sus magnitudes absolutas de menor a mayor usando enteros $\{1, 2, 3, \dots, N\}$ llevando el signo original de cada diferencia. El siguiente paso es calcular $T^{(+)}$ y $T^{(-)}$ que son la sumatoria de los enteros asignados a las diferencias positivas y negativas, respectivamente. A continuación se presentan las 3 pruebas de hipótesis propuestas.

- H_{0a} : no hay diferencia entre la heurística de asignar primero y rutear después con el método de ahorros.
- H_{1a} : sí hay diferencia.

Tabla 3.10. Cálculos para evaluar la hipótesis nula H_{0a}

Subestaciones	D	D	r(D)
Ancón 1	1.54	1.54	2
Carabayllo 3	5.92	5.92	6
Cieneguilla 2	4.55	4.55	5
La Molina 1	2.93	2.93	3
Lurigancho 3	3.58	3.58	4
VMT 2	-1.30	1.30	1

Elaboración propia

Se obtuvo $T^{(+)}=20$ y según tablas, para una muestra de $N=6$, le corresponde un p de 0.031 (Gibbons y Chakraborti, 2011). Es decir, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula H_{0a} con una prueba a dos colas con $\alpha=5\%$.

- H_{0b} : no hay diferencia entre la heurística de asignar primero y rutear después con el algoritmo del vecino más cercano.
- H_{1b} : sí hay diferencia.

Tabla 3.11. Cálculos para evaluar la hipótesis nula H_{0b}

Subestaciones	D	D	r(D)
Ancón 1	-3.03	3.03	2
Carabaylo 3	3.11	3.11	3
Cieneguilla 2	-1.31	1.31	1
La Molina 1	-4.61	4.61	5
Lurigancho 3	-3.18	3.18	4
VMT 2	-7.47	7.47	6

Elaboración propia

Se obtuvo $T^{(+)}=3$ y según tablas, para una muestra de $N=6$, le corresponde un p de 0.078 (Gibbons y Chakraborti, 2011). Es decir, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula H_{0b} con una prueba a dos colas con $\alpha=5\%$.

- H_{0c} : no hay diferencia entre el método de ahorros con el algoritmo del vecino más cercano.
- H_{1c} : sí hay diferencia.

Tabla 3.12. Cálculos para evaluar la hipótesis nula H_{0b}

Subestaciones	D	D	r(D)
Ancón 1	-4.58	4.58	2
Carabaylo 3	-2.81	2.81	1
Cieneguilla 2	-5.86	5.86	3
La Molina 1	-7.53	7.53	6
Lurigancho 3	-6.76	6.76	5
VMT 2	-6.18	6.18	4

Elaboración propia

Se obtuvo $T^{(+)}=0$ y según tablas, para una muestra de $N=6$, le corresponde un p de 0.016 (Gibbons y Chakraborti, 2011). Es decir, sí hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula H_{0c} con una prueba a dos colas con $\alpha=5\%$.

Con estas tres hipótesis realizadas, podemos concluir que el algoritmo del vecino más cercano es el que tiene menor desempeño de los tres y que no hay diferencia significativa entre usar el método en dos fases de asignar primero y rutear después o el método de ahorros. En cuanto a sencillez, la heurística en dos fases es el más rápido de ejecutar por lo que se elegirá como heurística para el total de subestaciones.

3.4.5 Ruteo con la heurística de dos fases

La primera fase se realizará usando el algoritmo de barrido como se explicó en la sección 1.2.2 y luego se ejecutará el modelo TSP para la fase de ruteo.

Fase de asignación

Para poder seguir los pasos definidos en el marco teórico, el depósito debe prefijarse como el origen de coordenadas. Las coordenadas están en UTM, es decir con origen de coordenadas en latitud 0 y longitud 0 en el mapa mundial. Se deberá trasladar el origen de los ejes X y Y hasta que coincida con el nodo del depósito y modificar las coordenadas de los demás nodos. En el nuevo sistema X' Y' el depósito tiene coordenadas (0,0) como se muestra en el gráfico 3.26. Las coordenadas de los demás nodos i se calculan así:

$$X'_i = X_i - X_d$$

$$Y'_i = Y_i - Y_d$$

Donde X_d y Y_d son las coordenadas del depósito.

A continuación se convertirán las coordenadas rectangulares a coordenadas polares teniendo como origen el depósito. Para calcular el ángulo de cada nodo con respecto al depósito se hace uso la función =ATAN2(x,y) de Excel, que devuelve el arco tangente de las coordenadas x, y especificadas, en radianes. Las coordenadas a ingresar a esta función son las obtenidas en el nuevo sistema X' Y'.

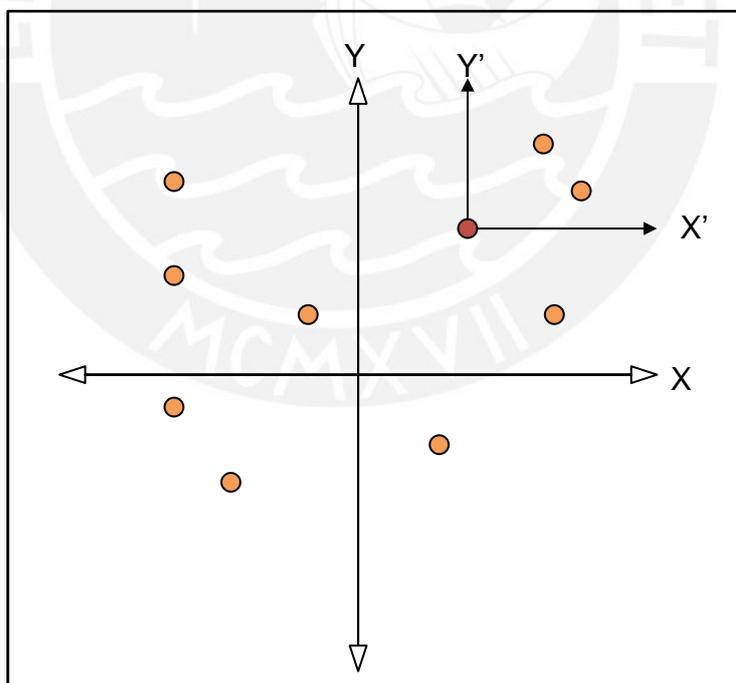


Gráfico 3.26. Cambio de ejes por traslación
Elaboración propia

Con estas consideraciones ya se pueden ejecutar los pasos de asignación indicados en la sección 1.2.2. Terminado esto corresponde realizar la fase de ruteo.

Fase de ruteo

Terminada esta primera fase de asignación se procede a la fase de ruteo. Como se indicó, puede optimizarse el ruteo por medio de un modelo TSP. La simplicidad de este modelo hace que el tiempo de ejecución del mismo sea cuestión de segundos utilizando un software de optimización como por ejemplo LINGO. En el gráfico 3.27 se observa el modelo TSP para un depósito y cinco clientes donde se observan los siguientes *sets*:

- Un *set* primitivo “NODO” con extensión 6 en este caso, conformado por un depósito y cinco clientes cuyo único atributo es la variable “U” que es la encargada de evitar *subtours*.
- Un *set* derivado “ARCO” formado por dos *sets* “NODO” que contiene a los atributos “DIST” y “X” que representan en parámetro distancia entre nodos, y la variable de decisión x_{ij} , respectivamente.

```
MODEL:
SETS:
NODO/1..6/:U;
ARCO(NODO,NODO):DIST,X;
ENDSETS
MIN = @SUM(ARCO(I,J):DIST(I,J)*X(I,J));
@FOR(NODO(K):@SUM(NODO(I):X(I,K))=1);
@FOR(NODO(K):@SUM(NODO(J):X(K,J))=1);
@FOR(ARCO(I,J)|J#GT#1:U(I)-U(J)+6*X(I,J)<=6-1);
@FOR(ARCO(I,J):@BIN(X(I,J)));
@FOR(NODO(I):@BND(0,U,5));
END
```

Gráfico 3.27. Modelo TSP en LINGO
Elaboración propia

La matriz de distancias se toma de los parámetros del modelo VRPTW desarrollado anteriormente. Este modelo TSP se correrá para optimizar cada agrupación formada en la primera fase de la heurística.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1 Distancia de recorrido

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos tras la ejecución de la heurística planteada en cada clúster. La función objetivo de los modelos propuestos es minimizar la cantidad de kilómetros recorridos, lo cual tiene un efecto en ahorro de combustible y una distribución de los bienes en un menor tiempo. En el anexo 12 se muestra el detalle de la distancia en kilómetros a recorrer en cada ruta calculada para cada subestación.

En el gráfico 4.1 se muestra un ejemplo de las rutas calculadas para el clúster de San Borja. Las líneas de color rojo trazadas en el gráfico indican la secuencia de nodos a visitar en cada ruta mas no qué caminos tomar para llegar a cada nodo. El camino dependerá de la disponibilidad de las vías debido al deterioro por el movimiento sísmico. Es por este motivo que se multiplicó a la distancia entre nodos por un factor que consideraba estos percances. Para este clúster en específico, se obtuvo cuatro rutas las cuales visitarán 13, 13, 12 y 12 nodos, respectivamente, cuyo total es de 50 nodos visitados. En este ejemplo cada ruta tiene en promedio un recorrido de 12 kilómetros. Las subestaciones de Ancón se ilustran como ejemplo en el anexo 13.

Cabe resaltar que en cada subestación, cada vehículo realiza un número determinado de viajes para cada grupo de artículos a repartir, tal y como se mostró en la tabla 3.7. La tabla 4.1 muestra la distancia total a recorrer para que se reparta la totalidad de *kits* de ayuda humanitaria no alimentaria a las 42 subestaciones. Este monto se calculó multiplicando el total recorrido en las rutas por el número de viajes a realizar, obteniendo aproximadamente 70 800 kilómetros de recorrido total en Lima Metropolitana y Callao. Este total será repartido por varios vehículos resultando aproximadamente un recorrido de 350 kilómetros por unidad móvil.

En la situación actual se tendría que recurrir a un almacén fuera de Lima para satisfacer toda la demanda. Por ejemplo, se acudiría al almacén de Ancash y la distancia de un viaje ida partiendo de un almacén en Lima resulta mayor a los 350 kilómetros calculados como promedio por unidad móvil en el escenario propuesto.

Es necesario resaltar que hay un precedente de despacho de bienes desde almacenes ubicados lejos de la zona afectada. Así por ejemplo, el terremoto de Pisco del 2007 fue tan severo que la elevada cantidad de damnificados obligó a que el INDECI tuviese que trasladar bienes de ayuda humanitaria almacenados en los depósitos, que gestiona dicha organización, ubicados en Arequipa, Huancavelica,

Huancayo, Puno y Tacna, así como desde zonas más alejadas como Piura, Chiclayo y Trujillo por el norte (INDECI, 2009).

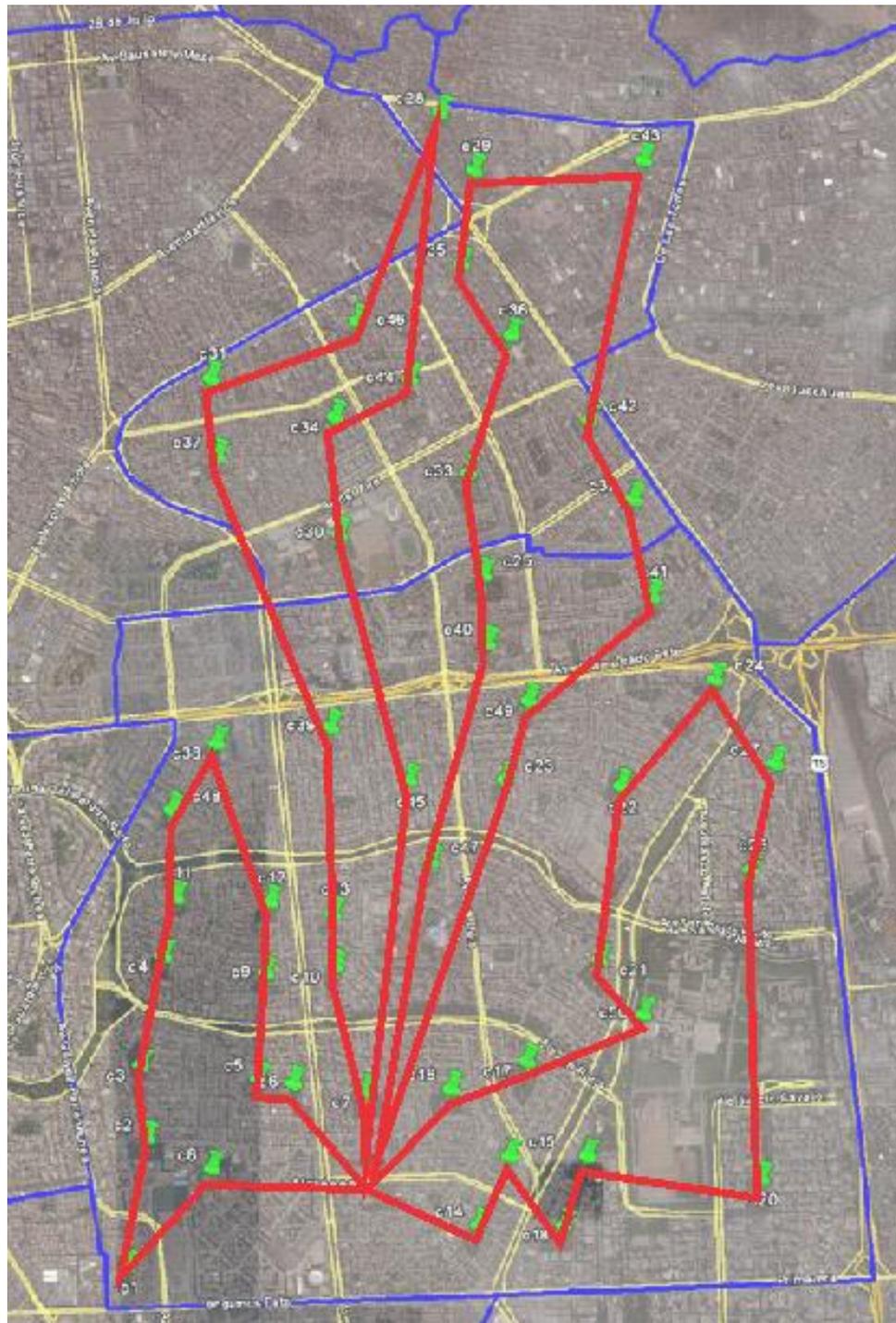


Gráfico 4.1. Ejemplo de rutas en clúster San Borja
Elaboración propia

Tabla 4.1. Distancia optimizada de rutas por subestación en kilómetros

Subestación	Distancia	Subestación	Distancia	Subestación	Distancia
Ancón 1	946.18	Cieneguilla 3	1 039.29	Pachacamac 3	6 186.14
Ancón 2	1 012.80	Cieneguilla 4	1 517.18	Punta Hermosa 1	1 852.56
Ancón 3	1 309.95	Comas 1	1 711.57	Punta Hermosa 2	6 319.57
Ancón 4	919.15	La Molina 1	798.56	San Borja 1	243.17
Ate 1	1 112.10	La Molina 2	2 304.07	San Isidro 1	703.15
Ate 2	1 544.33	La Victoria 1	389.32	San Juan de Lurigancho 1	2 676.63
Carabayllo 1	2 396.28	Lima 1	991.61	San Juan de Lurigancho 2	1 085.53
Carabayllo 2	2 287.24	Los Olivos 1	498.05	San Martín de Porres 1	2 017.78
Carabayllo 3	1 323.55	Lurigancho 1	1 249.91	San Miguel 1	335.76
Carabayllo 4	1 687.48	Lurigancho 2	1 685.22	Santa Rosa 1	1 229.68
Carabayllo 5	4 252.58	Lurigancho 3	1 122.28	Santiago de Surco 1	1 435.74
Chaclacayo 1	2 713.88	Lurigancho 4	1 891.62	Ventanilla 1	2 779.90
Cieneguilla 1	1 218.51	Pachacamac 1	1 261.83	VMT 1	744.21
Cieneguilla 2	2 307.44	Pachacamac 2	1 096.28	VMT 2	608.62

Elaboración propia

4.2 Tiempo de recorrido

Uno de los factores más importantes en este tipo de problemas es el tiempo de respuesta, el cual, según INDECI (2010) tiene como límite 72 horas después de ocurrido el desastre, para la distribución de ayuda humanitaria. Este tiempo dependerá directamente del número de vehículos con los que se cuente por subestación. Por ejemplo, si una subestación demorara 20 horas con 10 vehículos, aún tendría holgura suficiente como para realizar la distribución con la mitad de la flota pues demoraría 40 horas aproximadamente. Según esta lógica se analizará la sensibilidad que consistiría en variar el tamaño de la flota de vehículos en cada subestación.

Cada ruta se considera una tarea la cual debe repetirse una cantidad determinada de veces dependiendo del número de viajes calculado por clúster. Por ejemplo, si se tienen diez rutas en una subestación y se hicieran cuatro, cinco y seis viajes para los grupos de artículos A, B y C, respectivamente, se cuentan con 150 tareas, o viajes, a realizar. Este total de tareas se repartirá de la forma más equitativa posible entre un número de vehículos, el cual irá variando en cada escenario a evaluar. Se considera como la duración de la distribución en una subestación al tiempo que se tarde en repartir la ayuda humanitaria no alimentaria a toda la población damnificada.

El clúster de Ancón cuenta con cuatro subestaciones y la tabla 4.2 muestra el tiempo que demora la distribución de la ayuda humanitaria no alimentaria, en horas, para cada escenario. Se puede observar que incluso con cuatro vehículos por subestación

demorarían menos de 65 horas en abastecer a toda la población damnificada del clúster. Se debe considerar el tiempo de empadronamiento inicial que, en este caso, sería de a lo mucho 7 horas para poder cumplir la restricción de las 72 horas. Si hubiesen 10 vehículos disponibles, entonces toda la ayuda sería distribuida en aproximadamente un día después de finalizado el empadronamiento.

Tabla 4.2. Duración de la distribución para el clúster de Ancón en horas

Subestación	Vehículos							
	10	9	8	7	6	5	4	3
Ancón 1	24.19	27.55	30.97	34.51	40.32	48.36	60.98	80.51
Ancón 2	24.48	27.80	31.30	34.82	40.67	48.88	61.49	81.25
Ancón 3	25.44	28.96	32.64	36.24	42.32	50.83	64.03	84.55
Ancón 4	24.14	27.61	31.10	34.38	40.21	48.20	60.80	80.21

Elaboración propia

En la tabla 4.3 se muestran los resultados para el clúster de Ate, el cual tiene dos subestaciones. En este clúster se podría distribuir toda la ayuda dentro del plazo indicado con solo tres vehículos por subestación, incluso demorando hasta 15 horas en el empadronamiento. Con menor cantidad de vehículos ya resulta infactible cumplir con la exigencia de las 72 horas.

Tabla 4.3. Duración de la distribución para el clúster de Ate en horas

Subestación	Vehículos								
	10	9	8	7	6	5	4	3	2
Ate 1	15.95	18.54	19.97	23.39	26.18	31.76	39.27	52.36	78.54
Ate 2	17.63	20.16	21.48	25.41	28.58	35.01	42.87	57.16	85.74

Elaboración propia

Los resultados de las cinco subestaciones del clúster de Carabaylo se muestran en la tabla 4.4. Debido al tamaño del distrito, podría tomar un mayor tiempo el empadronamiento inicial por lo que se necesitarían mayor número de vehículos. Con una flota de seis o más vehículos por subestación ya se garantiza que se logrará cumplir con el tiempo establecido, otorgando hasta 10 horas de holgura para el empadronamiento. La tabla 4.5 muestra los resultados del clúster de Chacabuco, el cual solo tiene una subestación. Con cuatro vehículos se tiene 20 horas aproximadamente de holgura para realizar el empadronamiento inicial. Si se quiere priorizar aún más el tiempo de respuesta, con nueve vehículos se garantiza que la totalidad de ayuda humanitaria sería distribuida en un plazo de un día después de finalizado el empadronamiento inicial. Con tres vehículos o menos no se cumpliría con la exigencia de 72 horas.

Tabla 4.4. Duración de la distribución para el clúster de Carabayllo en horas

Subestación	Vehículos						
	10	9	8	7	6	5	4
Carabayllo 1	32.43	35.12	39.56	44.76	52.84	63.34	78.04
Carabayllo 2	31.08	34.64	38.94	44.20	52.30	61.67	77.23
Carabayllo 3	27.63	30.98	34.69	39.49	46.56	55.23	68.99
Carabayllo 4	28.84	32.50	36.29	41.17	48.47	57.58	72.22
Carabayllo 5	38.04	42.91	47.93	54.16	62.84	75.99	94.59

Elaboración propia

Tabla 4.5. Duración de la distribución para el clúster de Chaclacayo en horas

Subestación	Vehículos								
	10	9	8	7	6	5	4	3	2
Chaclacayo 1	21.85	24.08	26.56	32.23	35.08	42.75	52.62	70.15	105.23

Elaboración propia

Los resultados de las cuatro subestaciones de Cieneguilla se observan en la tabla 4.6. En esta podemos observar que con tres o menos vehículos por subestación resulta imposible cumplir con la distribución dentro de las 72 horas. Caso similar ocurre en la única subestación del clúster de Comas como se muestra en la tabla 4.7. Sin embargo, la tabla 4.8 muestra que con tres vehículos sí hay holgura suficiente para realizar la distribución en ambas subestaciones del clúster de La Molina.

Tabla 4.6. Duración de la distribución para el clúster de Cieneguilla en horas

Subestación	Vehículos							
	10	9	8	7	6	5	4	3
Cieneguilla 1	25.15	28.68	32.32	35.80	41.85	50.29	63.47	83.54
Cieneguilla 2	30.05	32.61	37.59	40.99	48.53	58.67	72.29	95.64
Cieneguilla 3	24.56	27.87	31.38	34.95	40.80	49.09	61.82	81.55
Cieneguilla 4	26.18	29.72	33.52	37.22	43.49	52.33	65.89	86.86

Elaboración propia

Tabla 4.7. Duración de la distribución para el clúster de Comas en horas

Subestación	Vehículos							
	10	9	8	7	6	5	4	3
Comas 1	22.74	24.91	27.13	31.52	36.96	43.70	54.26	72.97

Elaboración propia

Tabla 4.8. Duración de la distribución para el clúster de La Molina en horas

Subestación	Vehículos								
	10	9	8	7	6	5	4	3	2
La Molina 1	14.78	17.12	18.40	21.99	24.44	29.44	36.65	48.87	73.31
La Molina 2	19.96	23.37	25.07	29.33	32.80	39.80	49.20	65.60	98.40

Elaboración propia

La tabla 4.9 muestra los resultados del clúster de La Victoria la cual muestra que incluso con dos vehículos tiene holgura suficiente para la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria. Caso similar ocurre en el clúster de Lima mostrado en la tabla 4.10 con una holgura de siete horas aproximadamente para realizar el empadronamiento inicial.

Tabla 4.9. Duración de la distribución para el clúster de La Victoria en horas

Subestación	Vehículos						
	7	6	5	4	3	2	1
La Victoria 1	11.19	13.14	16.73	20.55	26.27	39.28	78.31

Elaboración propia

Tabla 4.10. Duración de la distribución para el clúster de Lima en horas

Subestación	Vehículos						
	7	6	5	4	3	2	1
Lima 1	19.30	21.78	25.94	32.65	43.77	64.86	129.72

Elaboración propia

La tabla 4.11 muestra que en el clúster de Los Olivos se puede abastecer a la población damnificada con dos vehículos obteniendo una holgura de más de 30 horas para otras actividades. Sin embargo, la tabla 4.12 muestra que para el clúster de Lurigancho se necesitan al menos cuatro vehículos para obtener una distribución dentro del límite de 72 horas, para cada una de sus cuatro subestaciones.

Tabla 4.11. Duración de la distribución para el clúster de Los Olivos en horas

Subestación	Vehículos						
	7	6	5	4	3	2	1
Los Olivos 1	11.70	13.95	17.41	21.85	27.69	41.25	81.93

Elaboración propia

Tabla 4.12. Duración de la distribución para el clúster de Lurigancho en horas

Subestación	Vehículos							
	10	9	8	7	6	5	4	3
Lurigancho 1	25.32	29.02	32.73	35.95	42.22	50.54	63.74	83.89
Lurigancho 2	26.79	30.58	34.45	38.02	44.52	53.49	67.42	88.72
Lurigancho 3	24.79	28.30	31.81	35.34	41.31	49.54	62.52	82.47
Lurigancho 4	27.59	31.85	35.90	39.01	46.04	55.07	69.26	91.02

Elaboración propia

Se puede observar en la tabla 4.13 los resultados de las tres subestaciones del clúster de Pachacamac. Para que la distribución resulte factible se deberá contar con una flota de más de cuatro vehículos en cada subestación. Si se cuenta con diez vehículos, la distribución de la ayuda se realizaría en menos de un día.

Tabla 4.13. Duración de la distribución para el clúster de Pachacámac en horas

Subestación	Vehículos							
	10	9	8	7	6	5	4	3
Pachacamac 1	21.90	25.28	27.65	32.21	36.82	43.75	56.42	73.56
Pachacamac 2	22.11	25.53	27.97	32.59	37.16	44.18	56.77	74.23
Pachacamac 3	23.02	26.55	29.10	33.81	38.72	46.00	59.23	77.28

Elaboración propia

La tabla 4.14 muestra los resultados del clúster de Punta Hermosa, donde se observa que para la primera subestación se necesitarían por lo menos cinco vehículos, mientras que para la segunda subestación, al menos siete. En el caso del clúster de San Borja, basta con solo un vehículo para distribuir toda la ayuda humanitaria no alimentaria dentro del plazo establecido, con veinte horas aproximadamente de holgura para otras actividades, como se muestra en la tabla 4.15. Un caso similar es el mostrado en la tabla 4.16 la cual indica que el clúster de San Isidro necesitaría al menos dos vehículos para distribuir todo a tiempo.

Tabla 4.14. Duración de la distribución para el clúster de Punta Hermosa en horas

Subestación	Vehículos							
	10	9	8	7	6	5	4	3
Punta Hermosa 1	28.37	32.21	36.24	40.96	47.54	56.72	70.66	94.90
Punta Hermosa 2	45.24	49.15	56.46	63.54	73.68	89.73	107.70	144.87

Elaboración propia

Tabla 4.15. Duración de la distribución para el clúster de San Borja en horas

Subestación	Vehículos			
	4	3	2	1
San Borja 1	13.44	18.47	26.76	53.11

Elaboración propia

Tabla 4.16. Duración de la distribución para el clúster de San Isidro en horas

Subestación	Vehículos						
	7	6	5	4	3	2	1
San Isidro 1	12.85	16.19	18.56	22.82	30.68	45.49	89.94

Elaboración propia

Los resultados del clúster de San Juan de Lurigancho se muestran en la tabla 4.17 la cual indica que la primera subestación necesitaría al menos cinco vehículos, mientras que la segunda subestación solo cuatro. Tanto para la primera como para la segunda subestación, resulta infactible distribuir los bienes con solo tres vehículos.

Tabla 4.17. Duración de la distribución para el clúster de San Juan de Lurigancho en horas

Subestación	Vehículos							
	10	9	8	7	6	5	4	3
SJL 1	30.12	33.78	37.97	42.75	50.24	60.11	75.74	99.74
SJL 2	24.69	28.06	31.54	35.17	41.12	49.30	62.09	82.06

Elaboración propia

La tabla 4.18 muestra los resultados del clúster de San Martín de Porres en la cual se aprecia que se necesitan al menos tres vehículos. Sin embargo, la tabla 4.19 indica que el clúster de San Miguel puede cumplir con la restricción de tiempo incluso con un solo vehículo teniendo una holgura de aproximadamente 12 horas para otras tareas. Se observa en la tabla 4.20 que el clúster de Santa Rosa también puede llegar a tener una holgura de 12 horas utilizando dos vehículos en la flota.

Tabla 4.18. Duración de la distribución para el clúster de San Martín de Porres en horas

Subestación	Vehículos								
	10	9	8	7	6	5	4	3	2
SMP 1	19.16	21.26	23.89	28.53	31.21	37.96	46.81	62.42	93.63

Elaboración propia

Tabla 4.19. Duración de la distribución para el clúster de San Miguel en horas

Subestación	Vehículos						
	7	6	5	4	3	2	1
San Miguel 1	8.99	10.43	11.91	15.04	20.56	29.94	59.53

Elaboración propia

Tabla 4.20. Duración de la distribución para el clúster de Santa Rosa en horas

Subestación	Vehículos						
	7	6	5	4	3	2	1
Santa Rosa 1	17.99	20.65	24.18	29.58	40.11	59.16	118.32

Elaboración propia

La tabla 4.21 muestra los resultados del clúster de Santiago de Surco, el cual necesitaría por lo menos tres vehículos para poder distribuir la ayuda sin demoras. Por otro lado, la tabla 4.22 muestra que el clúster de Ventanilla necesitaría no menos de cinco vehículos.

Tabla 4.21. Duración de la distribución para el clúster de Santiago de Surco en horas

Subestación	Vehículos								
	10	9	8	7	6	5	4	3	2
Surco 1	17.59	20.06	21.49	25.38	27.98	34.91	41.96	55.95	83.93

Elaboración propia

Tabla 4.22. Duración de la distribución para el clúster de Ventanilla en horas

Subestación	Vehículos						
	10	9	8	7	6	5	4
Ventanilla 1	32.70	36.87	41.42	46.50	54.78	65.35	81.93

Elaboración propia

Finalmente, la tabla 4.23 muestra los resultados del clúster de Villa María del Triunfo. Se observa que para cada una de las dos subestaciones se necesita de al menos tres vehículos para la distribución de los bienes de ayuda humanitaria no alimentaria. En ambos casos, el modelo se vuelve infactible si la flota por subestación fuese de solo dos vehículos.

Tabla 4.23. Duración de la distribución para el clúster de Villa María del Triunfo en horas

Subestación	Vehículos								
	10	9	8	7	6	5	4	3	2
VMT 1	14.58	16.80	18.20	21.70	24.13	29.11	36.20	48.27	72.40
VMT 2	14.19	16.21	17.64	21.11	23.38	28.17	35.07	46.76	70.14

VMT: Villa María del Triunfo
Elaboración propia

Podemos observar que la disminución en horas no es lineal con respecto al incremento en el tamaño de la flota. El gráfico 4.2 muestra el comportamiento de las subestaciones del clúster de Ancón. Se aprecia un mayor decremento al comparar flotas de 3 y 4 vehículos, que al comparar flotas de 9 y 10 unidades móviles. Conforme se vaya incrementando el número de vehículos, el tiempo va a ser cada vez menor; sin embargo, el decremento marginal será poco considerable y tal vez no justifique la inversión de tener un vehículo adicional en la flota. En las demás subestaciones sucede un comportamiento similar, como es el caso del clúster de Ate en el gráfico 4.3 y ya será decisión de las autoridades responsables de la gestión de estas tareas, la determinación del tamaño de flota ajustado al presupuesto con el que cuenten, entre otras razones.

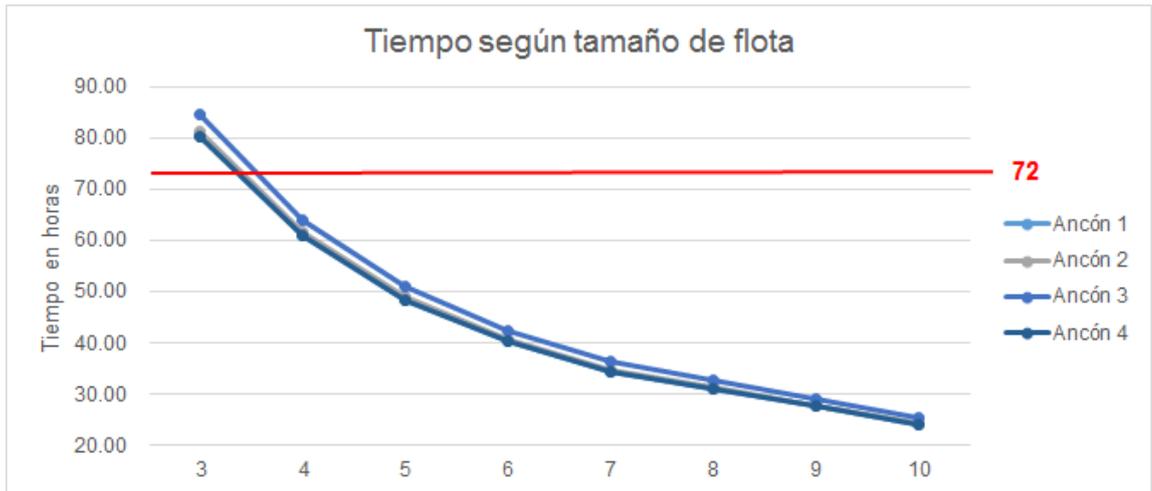


Gráfico 4.2. Decremento marginal de la duración en Ancón
Elaboración propia

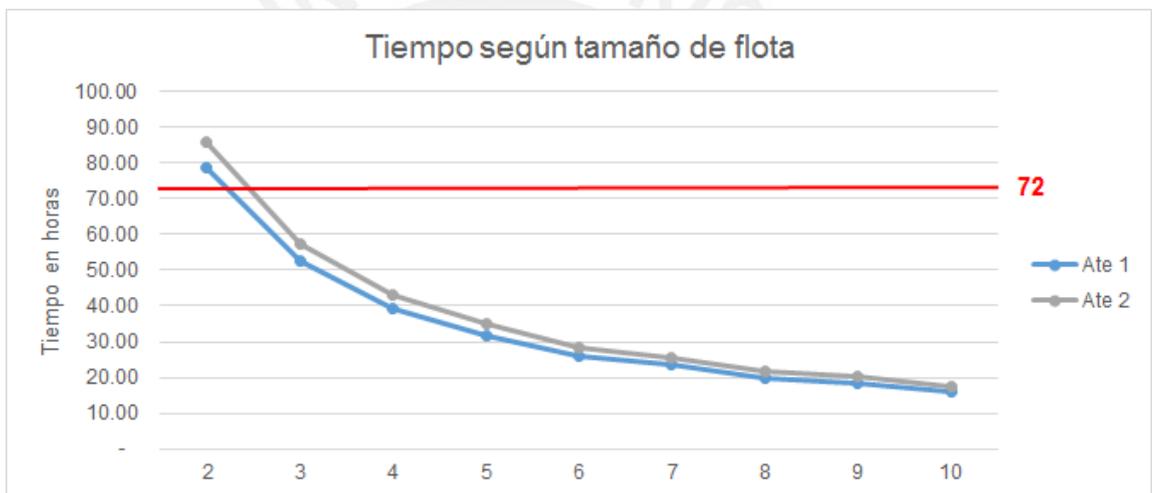


Gráfico 4.3. Decremento marginal de la duración en Ate
Elaboración propia

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La probabilidad que ocurra un terremoto en el Perú es significativa debido a su ubicación geográfica en el Cinturón de Fuego del Pacífico. En particular, en Lima Metropolitana y Callao, existe un silencio sísmico desde el terremoto de 1974 el cual ha ido almacenando energía la cual podría ser liberada con un gran sismo y posteriormente ocurriría un tsunami que afectaría principalmente el Callao. Asimismo, la intensidad del sismo será percibida según el tipo de suelo predominante en el distrito, los más afectados serían La Punta y Villa El Salvador.
- Lima Metropolitana y Callao presentan una vulnerabilidad por infraestructura (SINADECI, 2009) y también vulnerabilidad social por la capacidad limitada de sus servicios de salud, energía, provisión de agua y nivel de educación que limita los planes de preparación frente a desastres. Sin embargo, el Estado peruano cuenta con planes de operaciones para enfrentar las consecuencias de los desastres naturales.
- El estudio de esta tesis organizó el reparto de ayuda humanitaria con base en las normas del Proyecto Esfera, se ha enfocado el estudio en el tercer grupo denominado "Normas mínimas sobre alojamiento, asentamientos humanos y artículos no alimentarios" porque es un factor determinante en las fases iniciales de respuesta ante un desastre.
- Ante un terremoto de magnitud 8,0 Mw con epicentro frente a Lima se estima un total de 1 795 735 damnificados en Lima Metropolitana y Callao con mayor presencia en los distritos de San Juan de Lurigancho, Comas y Callao (Serpa, 2014). El modelo que mejor se acomoda para la distribución de ayuda humanitaria es un VRPTW para 42 subestaciones para explorar si es posible cumplir el requerimiento de 72 horas que sugiere INDECI para el reparto de la ayuda humanitaria; para determinar cuál es la cantidad de vehículos necesarios para dicho reparto y calcular la distancia recorrida. Se decidió dividir el *kit* de ayuda en tres grupos, separando los bienes individuales de los familiares, pues no se tiene la certeza del número de integrantes por familia. Además, si se integrase todo en un solo *kit* familiar volvería ineficiente al modelo pues en cada nodo solo podría dejar nueve *kits* a diferencia del modelo propuesto que reparte 229 *kits* del tipo A por nodo visitado, por ejemplo.

- El modelo propuesto de VRPTW presentó limitaciones en cuanto al tiempo elevado de corrida para obtener una solución factible y más aún para calcular la solución óptima. Así, se verificó lo que la teoría afirma, que el modelo VRPTW es *NP-hard*. Por esta razón fue necesario el uso de heurísticas evaluando el algoritmo de ahorros, el método en dos fases, y el algoritmo del vecino más cercano, que si bien, como toda heurística tiene la limitación de no encontrar la solución óptima, en contraparte sí permite obtener en un tiempo apropiado una buena solución. Con una muestra de seis subestaciones, se determinó que conviene usar el método de dos fases para todas las demás subestaciones porque a pesar de que no presenta diferencias significativas con las heurísticas de ahorros y el vecino más cercano, la ventaja que muestra es su sencillez de ejecución. Además, se obtuvo mejores resultados empleando heurísticas que ejecutando el modelo exacto por varias horas.
- Se logró cumplir con la meta de entregar la totalidad de *kits* de ayuda humanitaria no alimentaria dentro de las primeras 72 horas de ocurrido el terremoto recorriendo un total de 70 800 kilómetros. En Total se evaluó 397 rutas distintas y muchas de ellas se realizan más de una vez obteniendo un total de 6 907 viajes. Esto da un promedio de 10.25 kilómetros por viaje. Es importante resaltar que actualmente se tiene una capacidad nacional de abastecer a no más de 150 000 damnificados (Serpa, 2014), lo que representa menos del 10% del total repartido en este modelo. Asimismo, el plan propuesto tiene capacidad extra como para atender a 186 284 damnificados adicionales.
- Debido a que en algunos distritos se cumple con mucha holgura la meta de las 72 horas, es posible reducir el número de vehículos necesarios en cada subestación. Así, la cantidad inicial de 397 vehículos en total, puede reducirse a 156 unidades móviles distribuidas en Lima Metropolitana y Callao, asignando más viajes a los vehículos con holgura. Con esta cantidad también se garantiza cumplir con la distribución total en menos de 72 horas; sin embargo, con más vehículos disponibles se lograría una respuesta más rápida hacia los damnificados.

5.2 Recomendaciones

- La presente tesis puede ser punto de partida para investigaciones aplicadas a los almacenes de provincias.
- Se recomienda realizar un trabajo de investigación similar para el caso de otros tipos de ayuda humanitaria, como lo es la repartición de alimentos y agua potable, indispensable para este tipo de catástrofes.

- El presente modelo toma en cuenta el número de damnificados con base en las viviendas que resulten inhabitables; sin embargo hay otros factores que determinan la demanda de ayuda humanitaria.
- Se recomienda formar alianzas con empresas de transporte, indicando el número exacto de vehículos necesarios según indica el presente documento, para que puedan ser utilizados para la distribución de ayuda.
- Previo a la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria, se deberá hacer un censo poblacional rápido para determinar si un damnificado en verdad necesita ese tipo de ayuda.
- De un modo similar, recolectar información en el censo sobre requerimientos especiales que necesite la población damnificada, por ejemplo pañales o medicinas. En el almacén se cuenta con estos artículos especiales pero no serán distribuidos a toda la población afectada, solo a los que demuestren que lo requieren.
- Para la asignación de cargas se podría desarrollar una heurística más compleja y tener un mejor reporte de sensibilidad del número de vehículos por flota.
- Se puede obtener otra investigación con una proyección del número de damnificados más exacta aplicando luego la metodología propuesta en este estudio para desarrollar el plan de distribución de los bienes de ayuda humanitaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres y Asociación Peruana de Empresas de Seguros (2005) Estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico en 42 distritos de Lima y Callao. Lima, Perú.

Clarke, G. U., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4), 568-581.

Cordeau, J.-F., Desaulniers, G., Desrosiers, J., Solomon, M.M., & Soumis, F. (2000). The VRP with time windows. GERAD. Montréal.

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.

Desrochers, M., Lenstra, J. K., Savelsbergh, M. W., & Soumis, F. (1988). Vehicle routing with time windows: optimization and approximation. *Vehicle routing: Methods and studies*, 16, 65-84.

Gibbons, J. D., & Chakraborti, S. (2011). Nonparametric statistical inference. CRC Press. Florida.

Gillett, B. E., & Miller, L. R. (1974). A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. *Operations research*, 22(2), 340-349.

Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2001). Introducción a la investigación de operaciones, McGraw Hill. New York.

Instituto Geofísico Del Perú (2008) *Atlas ambiental de Lima*. Recuperado de <http://geoserver.itc.nl/lima/start/start.html>

Instituto Nacional de Defensa Civil. (2009). Lecciones aprendidas del sur - Sismo de Pisco, 15 agosto 2007. Lima, Perú: INDECI. (pp.24).

Instituto Nacional De Defensa Civil (2006) Sismos ocurridos en el Perú a través del tiempo. Oficina de Estadística y Telemática del INDECI. Lima, Perú.

Instituto Nacional De Defensa Civil (2010) Compendio estadístico de prevención y atención de desastres. Lima, Perú.

Instituto Nacional De Defensa Civil (2010) Estudio de peligro de maremoto en Lima y Callao y cartografía de las zonas inundables. Lima, Perú.

Instituto Nacional De Defensa Civil (2011) Plan de Operaciones de emergencia para el área metropolitana de Lima y la región del Callao. Lima, Perú.

Instituto Nacional De Estadística E Informática (2013) *Parque automotor nacional, por clase de vehículo*. Recuperado de <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/transport-and-communications/>

Labadie, N., Prins, C., & Prodhon, C. (2016). Metaheuristics for Vehicle Routing Problems. John Wiley & Sons.

- Laporte, G., Mercure, H., & Nobert, Y. (1986). An exact algorithm for the asymmetrical capacitated vehicle routing problem. *Networks*, 16(1), 33-46.
- Marianov, V., & ReVelle, C. (1995). Siting emergency services. *Facility Location: a survey of applications and methods*, 1, 199-223.
- Miller, C. E., Tucker, A. W., & Zemlin, R. A. (1960). Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM (JACM)*, 7(4), 326-329.
- Mole, R. H., & Jameson, S. R. (1976). A sequential route-building algorithm employing a generalised savings criterion. *Journal of the Operational Research Society*, 27(2), 503-511.
- Pardalos, P. M., Migdalas, A., & Burkard, R. E. (Eds.). (2002). *Combinatorial and global optimization (Vol. 14)*. World Scientific.
- Proyecto Esfera (2011) *Carta Humanitaria y Normas Mínimas para la Respuesta Humanitaria*. Rugby, Reino Unido: Practical Action Publishing.
- Reinelt, G. (1994). *The traveling salesman: computational solutions for TSP applications*. Springer-Verlag.
- Serpa, V. (2014) *Optimización y localización de almacenes de abastecimiento para la atención de un terremoto de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao* (Tesis de Licenciatura). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Sistema Nacional De Defensa Civil (2004) *Plan nacional de atención y prevención de desastres*. Lima, Perú.
- Sistema Nacional De Defensa Civil (2006) *Plan Nacional de Operaciones de Emergencia*. Lima, Perú.
- Sistema Nacional De Defensa Civil (2009) *Gestión del Riesgo de Desastres*. Lima, Perú.
- Sistema Nacional De Defensa Civil (2009) *Diseño de escenario sobre el impacto de un sismo de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao*, Perú.
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations research*, 35(2), 254-265.
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem*, Society for industrial and applied mathematics. SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications.
- Wilcoxon, F. (1945). Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics bulletin*, 1(6), 80-83.